

ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICOCHIMIQUES DE
MATÉRIAUX THERMOPLASTIQUES EN COMPOSITES DE CHANVRE :
COMPARABLE AUX PLASTIQUES TRADITIONNELS PÉTROCHIMIQUES ?

Par
Étienne Boulerice

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de François Lafortune

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Février 2019

SOMMAIRE

Mots clés : bioplastique, chanvre, composite, polymère, propriétés, thermoplastique

Une transition vers l'utilisation de produits plastiques durables implique inévitablement la substitution de polymères pétrosourcés par des plastiques biosourcés. Les thermoplastiques pétrosourcés constituent une grande part du marché mondial du plastique et représentent une importante quantité de produits dont certains substituts biosourcés émergent sur le marché international.

Le chanvre gagne en popularité parmi les sources principales servant au développement des bioplastiques, car il possède des propriétés comparables aux fibres synthétiques. Le chanvre est utilisé en tant que charge en composite avec différentes matrices thermoplastiques soit l'ABS, l'AC, le PEHD, le PLA et le PP. Or, pour que le plastique de chanvre puisse contribuer à la transition, certains aspects déterminants doivent être étudiés et comparés aux plastiques pétrochimiques traditionnels. Dans cet essai, les propriétés, le coût et les impacts majeurs sur l'environnement liés à la production des bioplastiques de chanvre sont comparés aux thermoplastiques pétrosourcés et ainsi analysés.

L'utilisation de fibres de chanvre pour la production de bioplastiques présente certains défis au niveau technique. L'élasticité, l'absorption d'humidité, la température de mise en forme et l'adhésion à la matrice constituent les principaux aspects qui représentent des limites dans l'utilisation de cette plante. Cependant, les composites de chanvre affichent une plus grande résistance à la traction et à la flexion dans tous les types de matrices par rapport aux thermoplastiques vierges, ainsi qu'une plus faible empreinte carbone, une demande énergétique inférieure et un coût plus faible dans la plupart des cas.

À la lumière des points forts et des points faibles identifiés grâce à l'analyse comparative des résultats, des modifications devraient être expérimentées. L'utilisation plus importante du chanvre avec des plastiques issus du système de récupération, des bioplastiques, ou encore des plastiques plus polluants semble être bénéfique dans de nombreux aspects. Néanmoins, le marché spécifique des biocomposites de chanvre doit être clairement identifié afin de maximiser le potentiel d'intégration de celui-ci dans le marché mondial.

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais premièrement remercier mon directeur d'essai, monsieur François Lafortune, qui m'a appuyé dès le début de ma démarche et m'a conseillé de façon judicieuse durant le processus de préparation et de rédaction. J'ai eu la chance de collaborer avec M. Lafortune qui m'a ouvert de nombreuses portes, soit pour présenter mon projet et mes idées à des événements environnementaux ou pour la fabrication d'échantillons en usine.

J'aimerais aussi remercier tous les professeurs qui m'ont enseigné dans mon cheminement à la maîtrise, qui m'ont permis de développer les compétences nécessaires à l'accomplissement de cet essai. Également, le personnel de soutien du CUFÉ qui a été extrêmement présent et généreux durant le processus.

Finalement, je souhaiterais remercier famille, amis et collègues qui m'ont encouragé et supporté tout au long de mon cheminement scolaire. Un merci particulier à mes parents, Pierre et Nathalie, sans qui je n'aurais pas eu l'opportunité d'étudier à la maîtrise en environnement à l'Université de Sherbrooke.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. MISE EN CONTEXTE	4
1.1 Définitions et notions.....	5
1.2 Polymère et polymérisation.....	5
1.3 Thermoplastique contre thermodurcissable	6
1.4 Mise en forme des thermoplastiques.....	8
1.4.1 Injection.....	9
1.4.2 Extrusion.....	10
1.4.3 Thermoformage.....	11
1.4.4 Calandrage	12
1.4.5 Rotomoulage	13
1.4.6 Résumé des types de mise en forme.....	13
1.5 Polymères thermoplastiques	14
1.6 Bioplastiques.....	14
1.7 Propriétés évaluées	15
1.7.1 Propriétés physiques et mécaniques.....	16
1.7.2 Propriétés dynamiques.....	18
1.7.3 Propriétés chimiques.....	18
1.7.4 Synthèse des propriétés évaluées.....	19
1.8 Fin de vie d'un thermoplastique	19
1.8.1 Recyclable	19
1.8.2 Fragmentation	21
1.8.3 Biodégradabilité.....	21

1.8.4 Compostable.....	22
1.8.5 Compostage industriel.....	24
2. LA FIBRE DE CHANVRE	25
2.1 Synthèse de la cellulose	25
2.2 Propriétés de la cellulose.....	26
2.3 Aspects environnementaux	27
2.4 Aspect économique	28
3. ACÉTATE DE CELLULOSE (AC).....	30
3.1 Propriétés.....	30
3.2 Structure et synthèse.....	31
3.3 Dégradation et impacts sur l'environnement.....	32
3.4 Coût et situation économique	33
3.5 Composites d'acétate de cellulose et chanvre	35
3.6 Résumé de l'AC	36
4. ACIDE POLYLACTIQUE (PLA)	38
4.1 Propriétés.....	38
4.2 Structure et synthèse.....	39
4.3 Dégradation et impacts sur l'environnement.....	41
4.4 Coût et situation économique	44
4.5 Composite de PLA et chanvre	45
4.6 Résumé du PLA	47
5. POLYÉTHYLÈNE HAUTE DENSITÉ (PEHD)	49
5.1 Propriétés.....	49
5.2 Structure et synthèse.....	51
5.3 Dégradation et impacts sur l'environnement.....	52

5.4	Coût et situation économique	53
5.5	Composite de PEHD et chanvre	55
5.6	Résumé du PEHD.....	57
6.	POLYPROPYLENE (PP)	58
6.1	Propriétés.....	58
6.2	Structure et synthèse.....	59
6.3	Dégradation et impacts sur l'environnement.....	61
6.4	Coût et situation économique	62
6.5	Composite de PP et chanvre	64
6.6	Résumé du PP	66
7.	ACRYLONITRILE BUTADIÈNE STYRÈNE (ABS)	67
7.1	Propriétés.....	67
7.2	Structure et synthèse.....	68
7.3	Dégradation et impacts sur l'environnement.....	69
7.4	Coût et situation économique	70
7.5	Composite d'ABS et chanvre.....	71
7.6	Résumé de l'ABS	73
8.	ANALYSE CRITIQUE	74
8.1	Analyse des propriétés.....	74
8.2	Environnement	76
8.3	Analyse économique.....	78
8.4	Facteurs contraignants	79
8.5	Facteurs favorables.....	80
8.6	Recommandations	81
8.6.1	Tester davantage le chanvre avec des plastiques recyclés	81

8.6.2 Établir un protocole et un registre d'utilisation du chanvre en composite thermoplastique	82
8.6.3 Viser l'utilisation dans les domaines correspondants aux caractéristiques des composites/marché spécifique	82
8.6.4 Favoriser l'utilisation du chanvre avec des bioplastiques pour la polarité des molécules.....	83
8.6.5 Favoriser l'utilisation du chanvre avec des polymères polluants.....	83
CONCLUSION	84
RÉFÉRENCES	86
ANNEXE 1 — TABLEAU SYNTHÈSE DES ÉLÉMENTS ANALYSÉS	94

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Structure moléculaire en deux dimensions de la Bakélite et du Nylon 6 respectivement.....	4
Figure 1.2	Structure de l'éthylène et du polyéthylène respectivement	5
Figure 1.3	Structure moléculaire d'un polymère thermoplastique et thermodurcissable respectivement.....	7
Figure 1.4	Structure moléculaire d'un polymère thermoplastique et thermodurcissable	7
Figure 1.5	Pourcentage d'utilisation des différents procédés de mise en forme de thermoplastiques.....	8
Figure 1.6	Exemples de produits plastiques mis en forme par injection, calandrage et extrusion.....	9
Figure 1.7	Schéma d'un système par injection de thermoplastique.....	10
Figure 1.8	Schéma d'un système d'extrusion thermoplastique.....	11
Figure 1.9	Illustration des différents types de moules utilisés par le thermoformage	12
Figure 1.10	Schéma du procédé de calandrage	12
Figure 1.11	Schéma d'une machine à rotomoulage.....	13
Figure 1.12	Sources et biodégradabilité de certains polymères	15
Figure 1.13	Illustration des différentes échelles de dureté utilisées chez les polymères.....	17
Figure 1.14	Illustration du classement des matières plastiques pour le système de récupération	20
Figure 1.15	Processus de compostage de produits plastiques.....	23
Figure 2.1	Structure moléculaire du D-Glucose et de la cellulose.....	25
Figure 2.2	Coûts de production de la culture du chanvre au Canada en 2015	28
Figure 3.1	Structure finale du butyrate d'acétate de cellulose	30
Figure 3.2	Illustration de l'acétylation de la cellulose en acétate de cellulose	32
Figure 3.3	Estimation de la croissance du marché de l'acétate de cellulose à partir des données de 2015	34
Figure 3.4	Résultats des essais de force de flexion, du module de flexion et du test Charpy	36
Figure 4.1	Schéma de la polycondensation du PLA.....	40
Figure 4.2	Comparaison des émissions de GES en kg éq. CO ₂ /kg de la production de certains polymères	42

Figure 4.3	Consommation d'énergie en MJ/kg de différents polymères.....	43
Figure 4.4	Illustration des différents coûts de production du PLA.....	44
Figure 4.5	Prédictions de l'évolution du marché mondial de PLA en milliards \$ US.....	45
Figure 4.6	Schéma du processus de fabrication du composite de PLA renforcé de fibres de chanvre	46
Figure 4.7	Résultats des tests de résistances effectués sur différents échantillons des composites de PLA et chanvre.....	46
Figure 5.1	Représentation de la structure moléculaire de polyéthylènes	49
Figure 5.2	Schéma des produits de distillation du pétrole brut.....	51
Figure 5.3	Émissions de GES associées à la production de différents polymères	53
Figure 5.4	Évolution du prix des ballots de PEHD aux couleurs mélangées récupéré de 2007 à 2017	54
Figure 5.5	Prédictions de l'évolution du marché mondial du PEHD en milliards \$ US.....	55
Figure 6.1	Exemple des différentes configurations de structures moléculaires d'un polymère (tiré de : University of Southern Mississippi, 2005)	59
Figure 6.2	Structure du propylène et du PP (tiré de : Alameen Fadlelmoula, 2008)	60
Figure 6.3	Schéma du processus de synthèse du PP (tiré de : Khan et al., 2014)	61
Figure 6.4	Production mondiale de PP par région en millions de tonnes (tiré de : Plastics Insight, 2018d)	63
Figure 6.5	Estimation du marché de PP entre 2016 et 2023 en milliards \$ US (tiré de : Plastics Insight, 2018d)	64
Figure 7.1	Illustration de la structure et de l'arrangement moléculaire des monomères de l'ABS	68
Figure 7.2	Estimation du marché de l'ABS entre 2016 et 2024 en milliards \$ US.....	70
Figure 7.3	Résistance à la tension et à la flexion de composites ABS en fonction du volume de fibres de chanvre	72
Figure 7.4	Module d'élasticité (rouge) des composites ABS en fonction du volume de fibres de chanvre	72
Figure 8.1	Formules d'estimation des émissions de GES et de la demande énergétique d'un kilo de fibres de chanvre	77

Tableau 1.1	Synthèse des types de mise en forme par polymère	14
Tableau 1.2	Synthèse des propriétés évaluées	19
Tableau 2.1	Propriétés de fibres de cellulose et de fibres synthétiques	26
Tableau 2.2	Paramètres environnementaux de la production de 1 kg de fibres de chanvre	27
Tableau 3.1	Propriétés de l'acétate de cellulose et de ses variétés	31
Tableau 3.2	Résumé des éléments principaux de l'AC.....	37
Tableau 4.1	Propriétés principales du PLA.....	38
Tableau 4.2	Synthèse des résultats des tests de dégradation du PLA	41
Tableau 4.3	Résumé des éléments principaux du PLA.....	47
Tableau 5.1	Les propriétés principales du PEHD.....	50
Tableau 5.2	Résultats des tests effectués sur les échantillons de PEHD avec fibres de chanvre en renfort.....	56
Tableau 5.3	Résumé des éléments principaux du PEHD	57
Tableau 6.1	Les propriétés principales du PP.....	58
Tableau 6.2	Propriétés mécaniques du PP et de ses composites de chanvre selon les différentes proportions de fibres	65
Tableau 6.3	Résumé des éléments principaux du PP	66
Tableau 7.1	Les propriétés principales de l'ABS.....	67
Tableau 7.2	Résumé des éléments principaux de l'ABS.....	73
Tableau 8.1	Synthèse des propriétés principales des polymères et composites.....	75
Tableau 8.2	Synthèse des données environnementales étudiées	77
Tableau 8.3	Prix des polymères et estimation des prix des composites en \$ US/kg	77

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
AC	Acétate de cellulose
AL	Acide lactique
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BAC	Butyrate d'acétate de cellulose
FM	Module d'élasticité
FS	Résistance à la flexion
GES	Gaz à effet de serre
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
PAC	Propionate d'acétate de cellulose
PC	Polycarbonate
PE	Polyéthylène
PEBD	Polyéthylène basse densité
PEHD	Polyéthylène haute densité
PET	Polytéréphtalate d'éthylène
PLA	Acide polylactique
PP	Polypropylène
PVC	Polychlorure de vinyle
TS	Résistance à la tension
TTV	Température de transition vitreuse

INTRODUCTION

Depuis quelques années, il est devenu impératif de réagir aux impacts évidents qu'a l'humain sur l'environnement. De la destruction des milieux de vie naturels affectant la biodiversité, en passant par les changements climatiques et la pollution de l'environnement, les impacts environnementaux résultant des activités humaines apparaissent de plus en plus graves. La montée de la conscience collective environnementale et du développement technologique notable ont permis le développement de milliers de projets innovateurs, cherchant à diminuer ou interrompre les impacts négatifs qu'ont les activités humaines sur l'environnement.

Parmi ces technologies, plusieurs visent à résoudre un enjeu devenu prioritaire, la surconsommation de plastiques et le fait que 82 % de ceux-ci ne soient pas recyclés (Recyc-Québec, 2015). Le faible taux de recyclage augmente les risques que le plastique se retrouve dans l'environnement, ce qui pose particulièrement problème dans les milieux aquatiques (Parker, 2017). La problématique principale réside dans le temps de dégradation extrêmement élevé — de plusieurs centaines d'années —, mais aussi de la pollution produite et de ses impacts directs sur la biodiversité (Parker, 2017). Partout dans le monde, des entreprises et des scientifiques tentent de trouver des substituts aux plastiques pétrochimiques, qui sont devenus indispensables aux industries et aux consommateurs, en développant différents bioplastiques (Gironi et Piemonte, 2011). Le groupe des bioplastiques est constitué des plastiques biosourcés, des plastiques biodégradables, ainsi que des plastiques possédant ces deux caractéristiques (Gironi et Piemonte, 2011).

La transition vers un monde utilisant uniquement des plastiques biodégradables apparaît comme un défi en raison de nombreux enjeux techniques et sociaux. D'abord, ces substituts doivent posséder des caractéristiques mécaniques et chimiques similaires aux polymères actuels afin qu'une transition soit possible. Du point de vue des entreprises, il est capital que la production à grande échelle de ces bioplastiques puisse s'opérer de façon économiquement viable, de l'acquisition de la matière première à la production et à l'élimination en fin de vie. Finalement, les aspects environnementaux liés aux cycles de vie des bioplastiques, en comparaison aux plastiques traditionnels, doivent présenter des impacts significativement

inférieurs ; ce n'est cependant pas toujours le cas, en particulier dans la phase de fin de vie du produit (Lauters, 2016).

Les sources potentielles de bioplastiques sont nombreuses de même que leurs caractéristiques. Certains seront facilement et rapidement éliminés en compostage industriel, mais nécessiteront des ressources importantes, une quantité d'énergie élevée ou un investissement économique trop grand. Cependant, les matériaux composites semblent faire bonne figure dans l'ensemble de ces aspects, soit concernant ses propriétés ainsi que sur les plans économique et environnemental.

Dans cet essai, il sera question de comparer les composites contenant des fibres de cellulose de chanvre. Selon la littérature scientifique, le chanvre représente une ressource qui possède des avantages dans les aspects présentés précédemment, soit environnementaux, économiques et en ce qui a trait aux propriétés mécaniques (Cherney et Small, 2016). Le chanvre possède l'avantage d'être cultivé en grande quantité sur des territoires variés en apportant des bénéfices agrologiques uniques (Cherney et Small, 2016). Néanmoins, la culture intensive d'une ressource, quelle qu'elle soit, soulève des enjeux économiques et environnementaux qui seront également présentés.

Avant la présentation des chapitres principaux, il y aura une mise en contexte de la situation, comportant la présentation de notions et définitions importantes qui serviront par la suite, au cours des différents chapitres.

L'objectif principal de l'essai consiste à comparer certains plastiques traditionnels et leurs formes en composites avec des fibres de chanvre. Ces plastiques traditionnels sont : l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polypropylène (PP), le polyéthylène haute densité (PEHD). Également, l'analyse inclura deux polymères occupant une grande part du marché des bioplastiques, l'acide polylactique (PLA) et l'acétate de cellulose (AC), en plus de leurs composites en chanvre. Ces thermoplastiques seront présentés et comparés dans le but d'en déterminer les éléments distinctifs. Chaque chapitre qui traite des plastiques traditionnels présentera les caractéristiques environnementales, économiques et physicochimiques de chaque polymère, ainsi qu'une section sur les propriétés du composite de chanvre, afin de

déterminer quel polymère semble le plus performant sous cette forme de composite et si les composites performant davantage dans un ou plusieurs aspects. L'objectif principal porte d'abord sur la comparaison de certaines caractéristiques physicochimiques des différents thermoplastiques.

Les objectifs secondaires concernent d'abord les impacts environnementaux respectifs de chaque polymère, considérant ses émissions de carbone durant son cycle de vie, l'énergie nécessaire à sa production et la fin de vie du matériau. En second lieu, afin de déterminer si une réelle transition semble possible avec ce type de bioplastique, un volet dédié au prix et à l'état économique des différents polymères sera présenté.

Finalement, l'analyse comparative et critique permettra d'identifier les facteurs généraux, récurrents ou spécifiques, favorables et défavorables, de l'utilisation du chanvre en composite plastique. L'analyse comparative de ces résultats permettra ultimement de tirer des recommandations objectives sur certains de ces éléments.

Pour assurer l'exactitude et la précision des résultats, de nombreuses sources et documents scientifiques crédibles ont été consultés. Ces sources sont extrêmement variées, tant sur le plan des types de documents et que des auteurs, et ont presque entièrement été publiées dans les vingt dernières années. Cet exercice importe afin de posséder les informations les plus récentes possible, étant donné qu'il s'agit d'un domaine de recherche et développement en pleine croissance (Lauters, 2016).

1. MISE EN CONTEXTE

Le premier plastique entièrement synthétique développé fût la Bakélite, en 1907, un polymère de benzène développé en Europe (Mark, 2009). Une polymérisation par étapes était alors utilisée, comme le nylon qui a eu gain de popularité peu après. Bien que le type de polymérisation soit identique, ils possèdent un monomère de base et une structure différente. Le caprolactame est le monomère nécessaire pour la synthèse du Nylon 6 et le benzène pour la Bakélite (Mark, 2009). La figure 1.1 présente la structure moléculaire de la Bakélite et du Nylon 6.

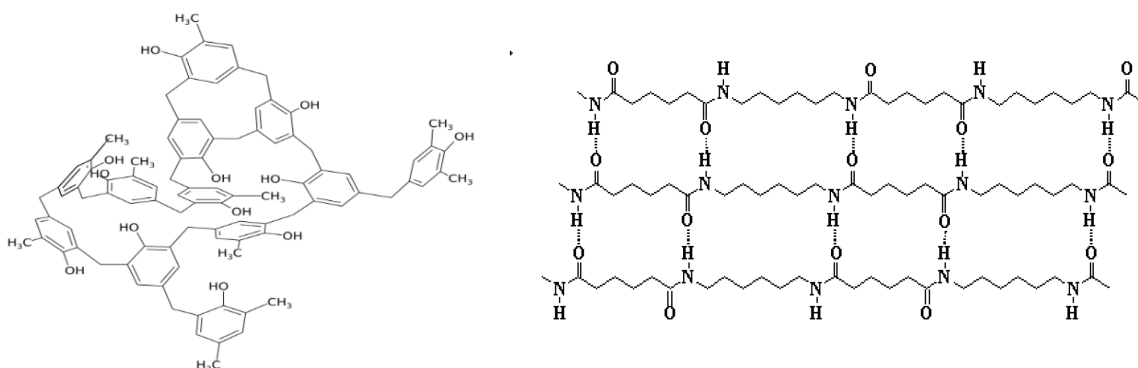


Figure 1.1 Structure moléculaire en deux dimensions de la Bakélite et du Nylon 6 respectivement (tiré de : Mark, 1999)

Les matières plastiques pétrochimiques ont été largement développées vers le milieu du 20^e siècle, d'abord par des chimistes de l'entreprise pétrolière Dupont aux États-Unis, lorsqu'ils ont développé le premier polymère de ce type en 1935 : le nylon (Mark, 2009). Cette invention a ouvert la porte au développement de nombreux autres polymères à prix abordable, avec une longue durée de vie et aux caractéristiques extrêmement variables en fonction des besoins d'utilisation (Mark, 2009). En dépit du fait que les bioplastiques aient été développés avant l'apparition de ces polymères pétrochimiques, ils furent rapidement remplacés, entre autres à cause du faible coût et de la facilité de production de ces derniers (Mark, 2009).

1.1 Définitions et notions

Les matières plastiques impliquent des concepts complexes, ainsi que de nombreux procédés et composés dans leur production. Il est donc essentiel de comprendre certains concepts qui seront décrits dans la section suivante. D'abord, une matière plastique se définit généralement comme un composé organique, obtenu par synthèse chimique, habituellement à partir de pétrole (Gironi et Piemonte, 2011).

1.2 Polymère et polymérisation

Une matière plastique est composée en grande partie de polymères, que l'on obtient à la suite d'une polymérisation de monomères ou de copolymères afin de produire des chaînes de molécules plus importantes (Hammami et Louati, 2016). Ce procédé utilise habituellement des molécules de sources pétrochimiques et la méthode peut différer d'un polymère à l'autre. Par exemple, la polymérisation par étapes couple les monomères en petits groupes avant de les assembler en polymère, tel le nylon (Hammami et Louati, 2016). La polymérisation radicalaire, utilisée pour la synthèse du PEHD, agit directement sur les électrons libres d'un atome ou d'un groupe d'atomes pour former des liens entre les molécules et former le polymère dans la réaction (Hammami et Louati, 2016). La polymérisation coordinative permet de produire des structures homogènes plus solides, avec le même monomère qu'une polymérisation radicalaire, par exemple avec de l'éthylène (voir figure 1.2). Ces deux types de polymérisation produisent des polymères différents, à savoir le polyéthylène basse densité et polyéthylène haute densité (Hammami et Louati, 2016). La polymérisation cationique est également utilisée au niveau commercial, mais pour la synthèse de plastiques thermodurcissables ou d'élastomères principalement (National Academy of Sciences, 1994).



Figure 1.2 Structure de l'éthylène et du polyéthylène respectivement (tiré de : Hammami et Louati, 2016)

La polycondensation est un phénomène moins rapide que la polymérisation conventionnelle et produit davantage de résidus liquides et gazeux (Hammami et Louati, 2016). Dans le cas contraire, si aucun résidu n'est obtenu, il s'agit d'une polyaddition (Hammami et Louati, 2016).

Ces polymères peuvent être utilisés dans de nombreux produits autres que les matières plastiques, comme dans les peintures, les résines et les colles (Mark, 2009). Pour la production de matières plastiques, à ces polymères sont couramment ajoutés trois principaux types de substances : un ou plusieurs additifs, un ou plusieurs plastifiants ainsi qu'une ou plusieurs charges (Mark, 2009). Un additif a pour rôle d'améliorer certaines caractéristiques de la matière plastique finale, par exemple, un agent stabilisant qui augmente la longévité de la matière plastique (Mark, 2009). Un plastifiant consiste en un ensemble de molécules, un oligomère, qui sert principalement aux propriétés de flexibilité du plastique (Mark, 2009). Ces substances, des phtalates, permettent une souplesse plus élevée à une température moindre (Mark, 2009). Une charge intégrée dans une matière plastique peut tenir un rôle différent par rapport au plastifiant. Cette substance peut servir simplement à abaisser le coût de production d'une matière plastique, améliorer une ou plusieurs propriétés physiques du plastique, etc. La fibre de verre joue le rôle de charge et est largement utilisée avec des matériaux plastiques, ayant pour rôle d'augmenter les propriétés de résistances physiques et thermiques du polymère (Mark, 2009). Également lorsqu'une matière plastique à un rôle spécifique et nécessite un caractère particulier, il est possible que des adjuvants soient ajoutés au polymère pour obtenir le produit fini. Un adjuvant est toujours présent en petite quantité dans la composition finale de la matière plastique, il s'agit souvent d'un colorant, d'un lubrifiant ou d'un stabilisant (Mark, 2009).

1.3 Thermoplastique contre thermodurcissable

Pour bien comprendre les différences fondamentales entre les matières thermoplastiques et les matières thermodurcissables, la figure 1.3 affiche les types de structures des deux familles de polymères.

Les matières plastiques se divisent en différentes catégories, partiellement par rapport à leur réaction à une augmentation de la température une fois leur structure finale atteinte. Certaines d'entre elles vont pouvoir être chauffées et ainsi changer de forme, alors que d'autres ne réagissent pas jusqu'à leur dégradation à plus haute température (Larcher, 2012).



Figure 1.3 Structure moléculaire d'un polymère thermoplastique et thermodurcissable respectivement (tiré de : Larcher, 2012)

Les matières thermoplastiques peuvent effectivement changer de forme lorsque chauffées à une certaine température sans affecter leur structure moléculaire (Davoudi, 2013). Les matières thermodurcissables, quant à elles, consistent majoritairement en résines qui contiennent des charges ayant des propriétés de résistance supérieures aux thermoplastiques (Davoudi, 2013). Cependant, en plus des risques biologiques et chimiques plus élevés, ces matières se dégradent lorsqu'elles sont suffisamment chauffées. La figure 1.4 illustre que les matières thermodurcissables possèdent davantage de liens dans leur structure en trois dimensions, ce qui explique leur plus grande résistance que les thermoplastiques à la chaleur (Davoudi, 2013).

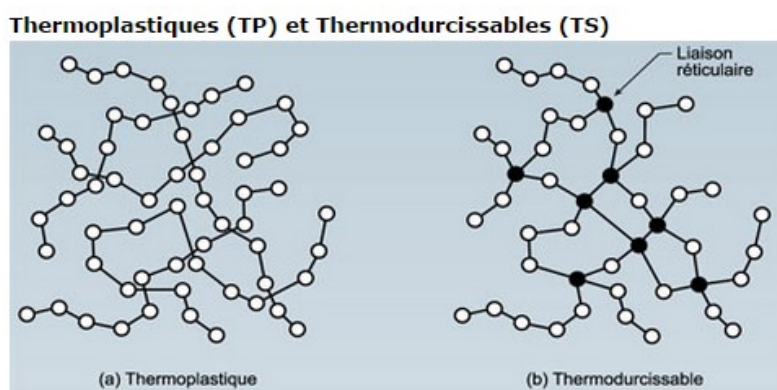


Figure 1.4 Structure moléculaire d'un polymère thermoplastique et thermodurcissable (tiré de : Recycled Plastics, 2014)

Une troisième catégorie de polymères, généralement thermodurcissables, existe (Davoudi, 2013). Il s'agit des élastomères, groupe de polymères qui englobe principalement le caoutchouc, mais également d'autres polymères synthétiques tels que le polybutadiène et le polyisoprène synthétique, tous deux utilisés dans la fabrication de gommes pneumatiques (Davoudi, 2013).

1.4 Mise en forme des thermoplastiques

De nombreuses méthodes de mise en forme des thermoplastiques ont été développées et sont utilisées par les industries, dépendant en partie du type de polymère utilisé et du produit conçu. De ces méthodes, la majorité des thermoplastiques utilisent les techniques de moulage par injection, d'extrusion ou encore le thermoformage (Hammami et Louati, 2016).

La figure 1.5 illustre l'importance de l'utilisation actuelle des différentes méthodes dans la mise en forme des thermoplastiques, extrusion films, de l'extrusion par gonflage et extrusion feuilles, du calandrage.

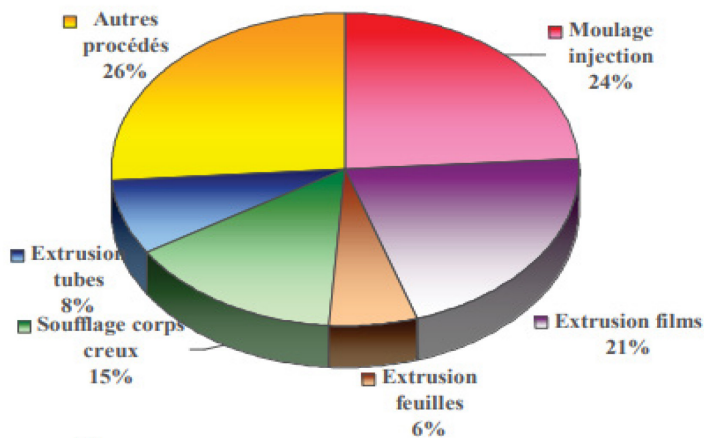


Figure 1.5 Pourcentage d'utilisation des différents procédés de mise en forme de thermoplastiques (tiré de : Hammami et Louati, 2016)

Comme illustré ci-dessus, plusieurs types d'extrusion existent en fonction de l'épaisseur du plastique et du type de polymère. La figure 1.5 indique également que le moulage par injection constitue environ le quart de toutes les mises en forme des thermoplastiques.

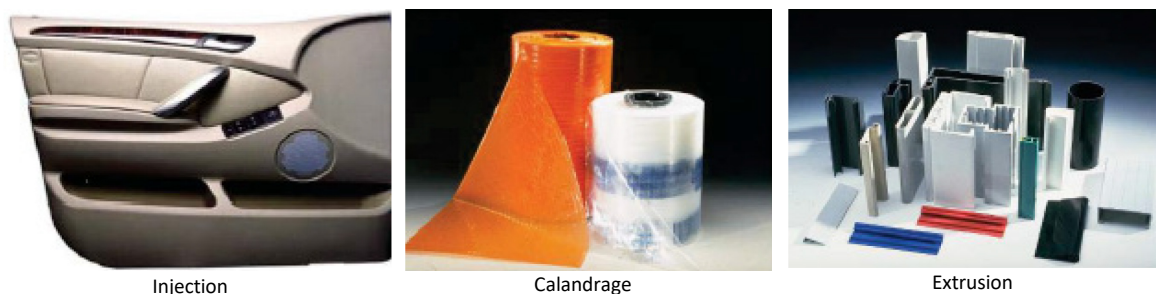


Figure 1.6 Exemples de produits plastiques mis en forme par injection, calandrage et extrusion (tiré de : Hammami et Louati, 2016)

La figure 1.6 illustre quelques exemples de produits plastiques mis en forme selon certaines méthodes qui sont détaillées ci-dessous. Le moulage par injection sert à confectionner de nombreuses pièces automobiles, mais également des pièces d'appareils électroniques et des composants commerciales. Le calandrage est un procédé de mise en forme continue, tout comme l'extrusion, dont les produits sont parfois mis en forme à l'aide d'une autre technique par la suite (Hammami et Louati, 2016).

1.4.1 Injection

L'injection de matière plastique est une technique utilisée par les industries qui fonctionnent à un rythme de production souvent très élevé, telle l'entreprise LEGO, qui doit produire 31 milliards de pièces en acrylonitrile butadiène styrène (ABS) chaque année (Palmer, 2015). Les possibilités avec cette technique sont variées, autant sur le plan de la dimension des pièces fabriquées que dans la complexité de celles-ci. La technique consiste simplement à souffler de la matière plastique dans un moule ayant la forme de l'objet qui doit être obtenu. Cette matière plastique se trouve normalement en pastilles de plastique qui sont chauffées et fondues au début du processus (Hammami et Louati, 2016).

Une presse à injection classique peut atteindre une force de fermeture de 3000 tonnes (t) avec une pression sur la matière plastique de 2000 bars (Hammami et Louati, 2016). La figure 1.7 illustre un système hydraulique qui fournit la puissance à la machine, le moule et le vérin de fermeture qui se situe à la fin du cycle. De l'autre côté, le fourreau, la trémie et la vis servent d'ensemble de plastification et d'injection (Hammami et Louati, 2016).

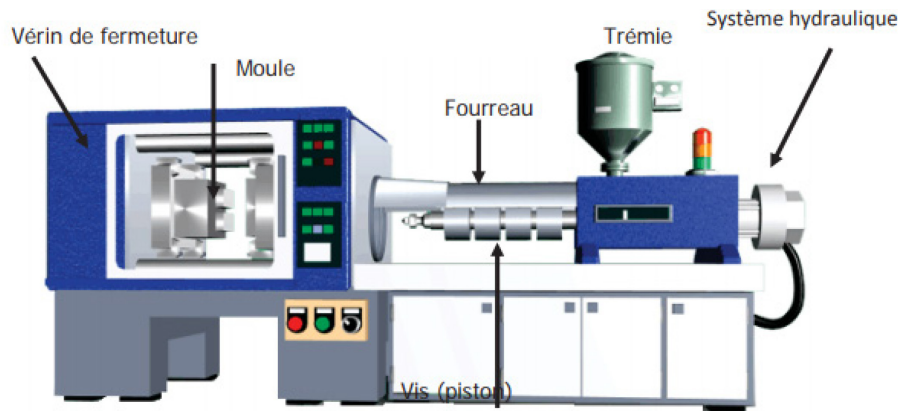


Figure 1.7 Schéma d'un système par injection de thermoplastique (tiré de : Hammami et Louati, 2016)

Un système de refroidissement agit sur le thermoplastique moulé et éjecte le produit dans le but de produire d'autres pièces le plus rapidement possible. La vis de plastification tient le rôle le plus important du système puisqu'elle transporte le plastique fondu, l'injecte et le comprime dans le moule en s'assurant de l'homogénéité de la matière et de ses additifs (Hammami et Louati, 2016).

1.4.2 Extrusion

Ce procédé peut être utilisé avec la plupart des thermoplastiques et certains élastomères (Wibowo et al., 2004). L'ensemble des polymères étudiés dans cet essai peuvent être utilisés par ce type de mise en forme (Wibowo et al., 2004). Le processus consiste simplement à acheminer la matière plastique sous sa forme solide, la chauffer à son point liquide et de pomper la matière dans la tête d'extrusion qui forme et refroidit le produit final (Hammami et Louati, 2016).

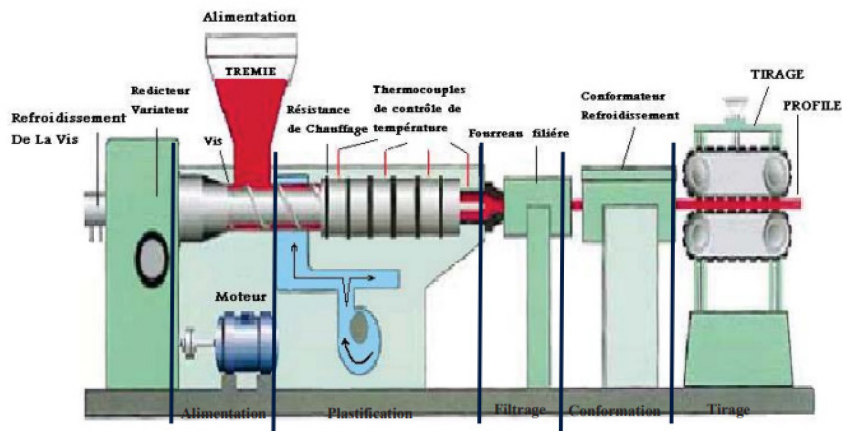


Figure 1.8 Schéma d'un système d'extrusion thermoplastique (tiré de : Hammami et Louati, 2016)

Dans le bas de la figure 1.8, on peut voir les différentes étapes et les pièces qui interagissent pour effectuer ces actions. Le système est conçu de sorte que la production peut s'opérer de façon continue, mais avec certains types de produits spécifiques (Hammami et Louati, 2016). Ce type de mise en forme peut également s'appliquer aux pellicules plastiques par le procédé d'extrusion-soufflage (Wibowo et al., 2006).

1.4.3 Thermoformage

Le procédé de thermoformage est simple et efficace, utilisant des matières plastiques déjà formées en plaques ou en feuilles (Hammami et Louati, 2016). La technique consiste à chauffer une feuille de plastique dans un moule, jusqu'à ce qu'elle soit complètement moulée, pour ensuite être refroidie. Il existe deux principales variantes à ce processus, soit en créant un vide et en aspirant le plastique chauffé pour qu'il soit moulé. La seconde consiste à appliquer le moule à l'aide d'une presse hydraulique sur la feuille de plastique chauffée, comme l'illustre la figure 1.9 (Hammami et Louati, 2016).

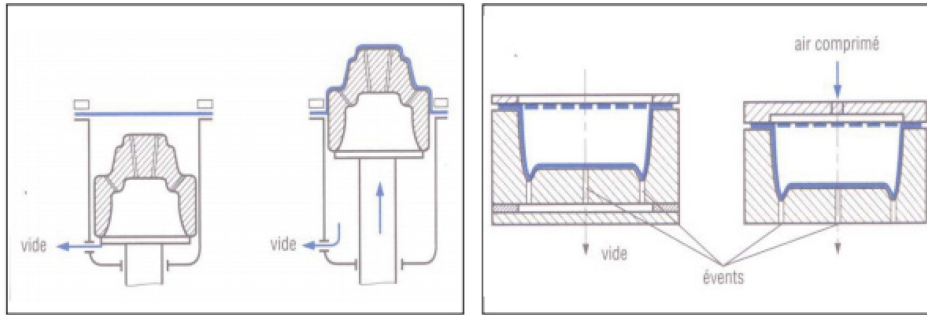


Figure 1.9 Illustration des différents types de moules utilisés par le thermoformage (tiré de : Hammami et Louati, 2016)

Le procédé se compose en trois étapes principales, la première consistant à chauffer la feuille de plastique installée dans la machine. Par la suite, la feuille chauffée est formée par le moule selon l'une des techniques présentées ci-dessus, pour finalement être découpées et disposées. Il est à noter que les deux techniques nécessitent une aspiration d'air avant que le produit final soit refroidi dans le but d'éviter les imperfections (Hammami et Louati, 2016). La technique utilisée dépend du type de produit recherché.

1.4.4 Calandrage

Cette technique utilise des cylindres à température élevée en rotation qui, à l'aide d'un convoyeur, produisent une pellicule continue de thermoplastique. Cette technique s'applique pour la production de polyéthylène (PE) et de polychlorure de vinyle (PVC), dans certains cas (Hammami et Louati, 2016).

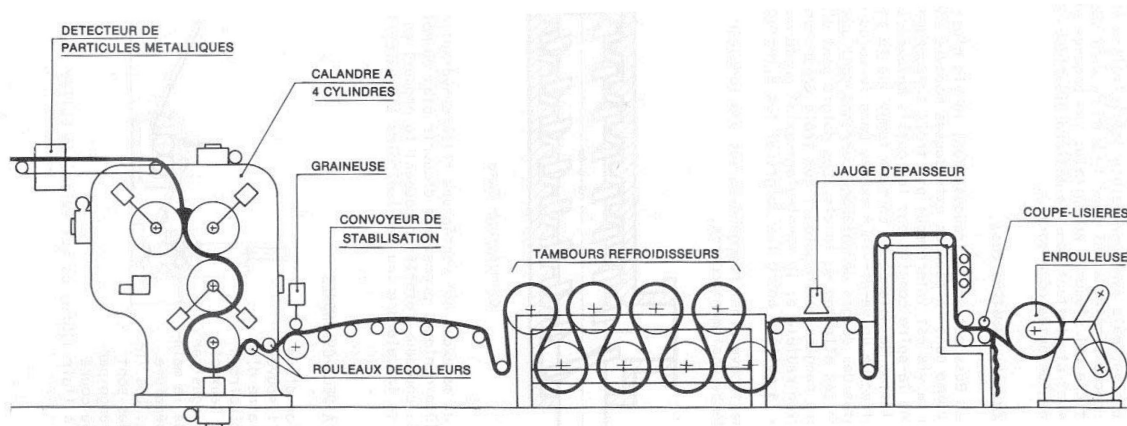


Figure 1.10 Schéma du procédé de calandrage (tiré de : Hammami et Louati, 2016)

Le système (voir figure 1.10) débute à la gauche de l'image où le polymère est intégré sous forme de pastilles, ou autre, chauffé et écrasé par des rouleaux avant d'être refroidi (Hammami et Louati, 2016). Une fois refroidi, le produit est soit coupé de façon constante ou enroulé s'il s'agit de films (Hammami et Louati, 2016).

1.4.5 Rotomoulage

Le rotomoulage est une technique utilisée pour la production de thermoplastiques aux formes anormales, creuses ou vides, entre autres. La matière plastique est intégrée sous forme de poudre et non de pastilles comme dans la plupart des techniques détaillées précédemment (Hammami et Louati, 2016). La poudre de plastique est insérée à l'intérieur de la machine à rotation pour ensuite être chauffée. La machine réalise ensuite des rotations pour répartir adéquatement le plastique fondu dans l'ensemble du moule avant de le refroidir (Hammami et Louati, 2016).

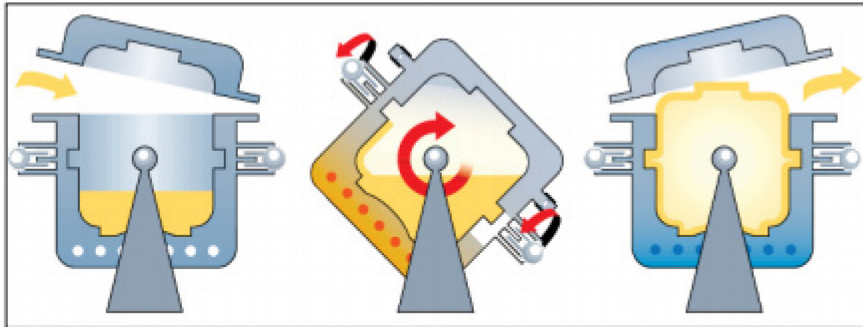


Figure 1.11 Schéma d'une machine à rotomoulage (tiré de : Hammami et Louati, 2016)

La machine à rotomoulage (voir figure 1.11) comprend deux pièces principales qui permettent d'intégrer la poudre de plastique et de retirer le produit final. Cette technique utilise de nombreux types de thermoplastique, mais a une capacité de production plus limitée que le thermoformage ou l'injection.

1.4.6 Résumé des types de mise en forme

Le tableau 1.1 résume les types de mise en forme associés aux polymères étudiés dans cet essai.

Tableau 1.1 Synthèse des types de mise en forme par polymère

POLYMÈRE	CALANDRAGE	THERMOFORMAGE	ROTOMOULAGE	INJECTION	EXTRUSION
ABS	✓	✓	✓	✓	✓
AC	✓	✓		✓	✓
PEHD		✓	✓	✓	✓
PLA		✓		✓	✓
PP	✓	✓	✓	✓	✓

Le PP et l'ABS offrent l'avantage de pouvoir être mis en forme par l'ensemble des types de mise en forme présentés. Également, l'entière des polymères peuvent être mis en forme par thermoformage, injection et extrusion, à différentes températures.

1.5 Polymères thermoplastiques

Dans cette étude, trois thermoplastiques pétrochimiques et deux thermoplastiques biosourcés seront comparés à leurs composites de chanvre. Ces thermoplastiques (ABS, PP, PEHD, PLA et AC), qui dominent le marché mondial, possèdent certaines caractéristiques physicochimiques similaires et d'autres distinctes. Ces différences permettent d'analyser l'effet qu'ont les fibres de chanvre sur les différents types de polymère et si une tendance se dessine sur certains éléments.

1.6 Bioplastiques

Un bioplastique est défini comme une matière plastique constituée d'au moins 40 % de matière d'origine végétale ou biodégradable (Lauters, 2016). En effet, le groupe des bioplastiques est constitué des plastiques biosourcés et des matières plastiques biodégradables, certaines de ces matières étant l'un et l'autre à la fois (Gironi et Piemonte, 2011). Le PLA est un exemple de ce type de matière plastique, à la fois biosourcé et biodégradable (Hu et Lim, 2007). L'AC est un autre exemple de matière plastique biosourcée, qui n'est cependant pas nécessairement biodégradable (Ouajai et Shanks, 2009).

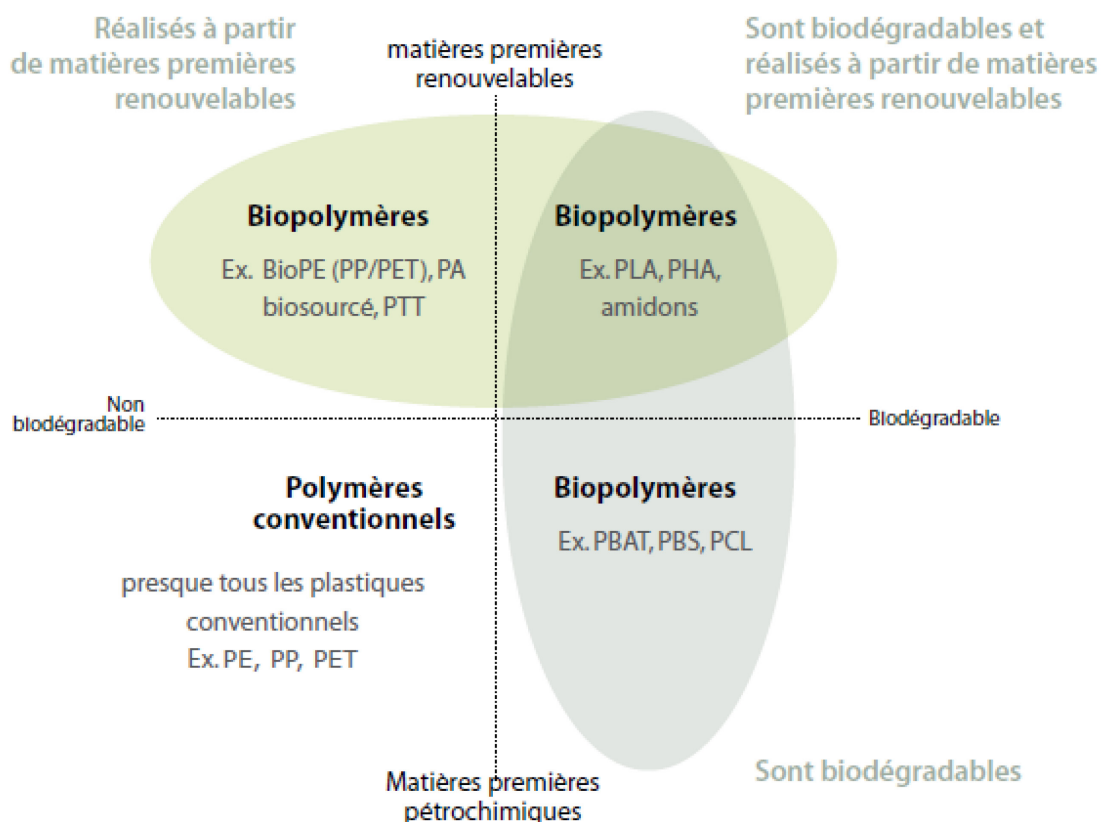


Figure 1.12 Sources et biodégradabilité de certains polymères (tiré de : Goossens, 2012)

La figure démontre bien que certains polymères pétrosourcés peuvent être considérés comme biodégradables. Cependant, ces types de polymère sont souvent très dispendieux en comparaison à ceux pétrosourcés non biodégradables (Goossens, 2012).

1.7 Propriétés évaluées

Dans cette étude, plusieurs propriétés physicochimiques ont été sélectionnées pour être comparées entre les différents thermoplastiques choisis. Il est à noter que certaines de ces propriétés ne sont pas disponibles pour l'intégralité des composites en chanvre étudiés, mais sont évaluées pour au moins un de ces derniers. Ces tests sont entièrement régulés par différentes normes ISO et ASTM afin de pouvoir faire la comparaison de résultats équivalents (Crompton, 2012).

1.7.1 Propriétés physiques et mécaniques

- La résistance à la traction (TS) représente un paramètre de base dont le test consiste à placer un échantillon de polymère dans une machine qui le saisit par les extrémités et effectue une traction, soit de tirer à vitesse constante jusqu'au point de rupture, et qui note la force nécessaire pour y arriver (École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne [EMSE], 2012). Ce test procure différentes données, dont la valeur E, la constante du module de Young, qui permet de calculer l'élasticité du matériau (EMSE, 2012). Une grande élasticité causera une valeur E peu élevée et une faible élasticité provoquera au contraire une valeur E élevée (EMSE, 2012).
- Le test de flexion consiste à installer un morceau du matériau sur deux appuis, laissant un vide sous le centre de la pièce (EMSE, 2012). Par la suite, un ou plusieurs points de flexion appliquent une force et la résistance du matériau jusqu'au point de fracture est mesurée (EMSE, 2012).
- La valeur du module d'élasticité (TM), aussi appelé module de tension ou module de Young, détermine la propriété de déformation en mettant en ratio la contrainte mécanique que subit le thermoplastique en fonction de la déformation de ce dernier (EMSE, 2012). Le test pour obtenir ce résultat permet également de connaître la force de flexion, en calculant la déformation réversible maximale d'un matériau en fonction de la force exercée (Crompton, 2012). Plus la valeur du module d'élasticité est élevée, plus le matériau est rigide. Un élastomère possède donc une très faible valeur contrairement, par exemple, aux fibres de carbone.
- La résistance au test Charpy est un essai pour évaluer des matériaux, légèrement moins commun que les tests mécaniques précédents. Ce test consiste essentiellement à évaluer la résistance à l'impact jusqu'à la rupture d'un matériau avec un outil spécialisé (Senčič, Šolić et Leskovšek, 2014). L'outil utilise un effet de levier qui calcule l'énergie nécessaire pour fracturer l'échantillon du matériau lors de son balancement (Senčič et al., 2014). La différence d'énergie est calculée en analysant la distance parcourue par le mouton-pendule après la fracture par rapport à sa hauteur de départ (Senčič et al., 2014).

Un test similaire est parfois effectué plutôt que le test de Charpy ; il s'agit du test de résistance au choc Izod. Pour ne pas porter à confusion lors de la présentation des propriétés, les données obtenues seront entièrement converties en valeur du test de

Charpy. Pour ce faire, les valeurs du test de résistance au choc Izod sont multipliées par 2,738233. Les différences de ces deux essais se situent principalement au niveau de la position et de la taille de l'échantillon, étant positionnées à la verticale avec des dimensions variantes.

- L'allongement à la rupture désigne une propriété déterminée en pourcentage (A %) à la suite d'un test d'allongement. Il s'agit simplement d'étirer le matériau, comme dans un test de traction, jusqu'à ce que le polymère se rompe complètement (Crompton, 2012). Par exemple, le PEHD a un A de 150 % par opposition à un A de 35 % seulement pour l'ABS (Crompton, 2012).
- La dureté d'un matériau représente la résistance de la surface à la suite de l'application d'un poinçon sur un échantillon. Un polymère qui ne laisse pas ou peu de marques est considéré comme dur (Crompton, 2012). Il existe plusieurs échelles de dureté, similaires aux échelles de température, les valeurs varient grandement, mais peuvent être comparées dans une charte de conversion.

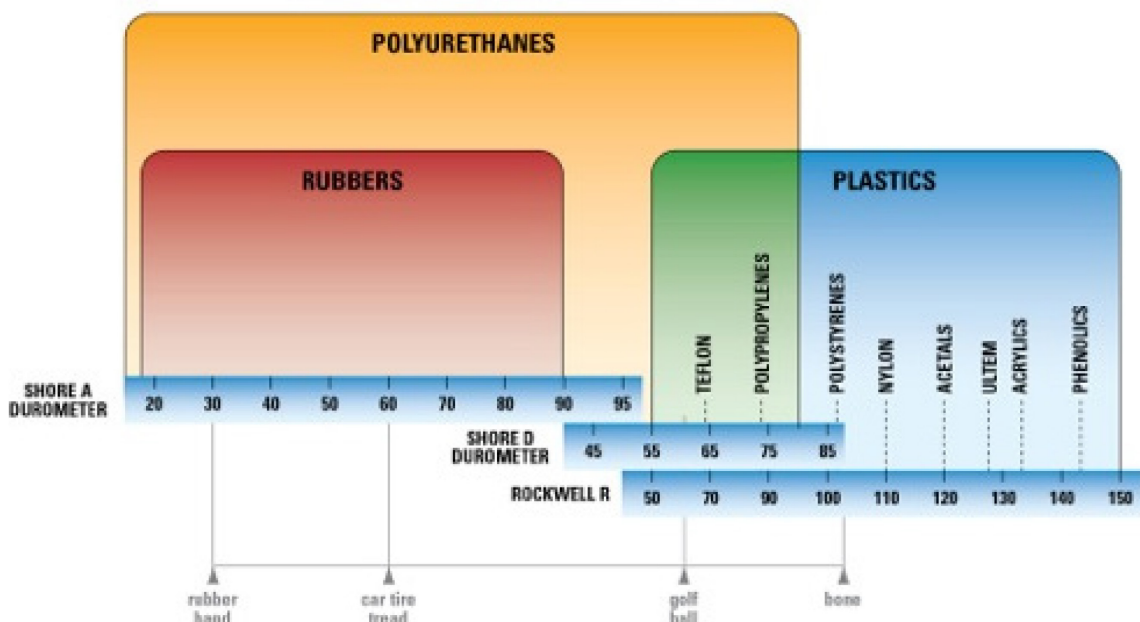


Figure 1.13 Illustration des différentes échelles de dureté utilisées chez les polymères (tiré de : Plastics International, 2018)

Les duromètres Shore D et Rockwell R sont les échelles qui s'appliquent aux thermoplastiques présentés dans cette étude.

- La densité est obtenue en divisant la masse du polymère par le volume qu'il occupe et est exprimée en gramme par centimètre cube (Mark, 2009). La densité des polymères varie généralement entre la densité du polyméthylpentène et de certains polymères thermodurcissables se situant entre 0,830 g/cm³ et 2,15 g/cm³ (Mark, 2009). Ce paramètre influence le type d'utilisation potentielle d'un matériau composite dans la mesure où le marché électronique et de l'automobile recherche des pièces à plus faible densité, contrairement au secteur industriel (Mark, 2009).

1.7.2 Propriétés dynamiques

- La température de transition vitreuse (TTV) est identifiée par l'unité T_v , ou T_g en anglais. La T_v consiste en la variation de température d'un matériau nécessaire pour atteindre deux états distincts, amorphes et vitreux (Lecomte-Beckers, 2009).

Ce paramètre permet entre autres d'identifier quel type d'utilisation dépasse les limites du polymère dans l'éventualité où il serait exposé à des modifications importantes de température (Lecomte-Beckers, 2009). La T_v prend en compte la vitesse du changement de température en plus des limites de température jusqu'à la déformation plastique du polymère, sans que soit affectée la configuration moléculaire de ce dernier (Lecomte-Beckers, 2009).

Plusieurs paramètres influencent la valeur T_v chez un polymère, dont la masse molaire, la structure (cristalline, semi-cristalline ou amorphe) et la vitesse de changement de température du matériau (Lecomte-Beckers, 2009).

1.7.3 Propriétés chimiques

- Le degré de saturation d'humidité d'un matériau est un paramètre qui affecte principalement les bioplastiques et les composites thermoplastiques (Reis et al., 2001). Il s'agit d'un facteur qui peut affecter les propriétés physicochimiques d'un thermoplastique de façon importante (Reis et al., 2001). La résistance aux impacts et l'élasticité sont les principales caractéristiques pouvant être altérées par le degré d'humidité du polymère (Reis et al., 2001). De nombreux facteurs influencent le degré de saturation d'humidité d'un matériau thermoplastique, dont la disposition des fibres, parallèles ou perpendiculaires, le type de fibres, etc. (Reis et al., 2001). Le test consiste

simplement à déposer un échantillon dans une enceinte à 23 °C à un taux de 80 % d'humidité et de calculer le poids de l'humidité à la suite de l'absorption en fonction du temps (Reis et al., 2001).

1.7.4 Synthèse des propriétés évaluées

Voici ci-dessous le tableau 1.2 qui offre une synthèse résumant les propriétés évaluées et l'unité par laquelle elles sont exprimées.

Tableau 1.2 Synthèse des propriétés évaluées

Tests	Unité
Résistance à la traction	MPa
Résistance à la flexion	GPa
Module d'élasticité	MPa
Dureté	SD/RR
Densité	g/cm ³
Résistance au test Charpy	kJ/m ²
Allongement à la rupture	%
Température de transition vitreuse	°C
Taux d'absorption d'humidité	%

1.8 Fin de vie d'un thermoplastique

La fin de vie d'un thermoplastique est la cause principale du besoin de transition vers des matériaux plastiques biodégradables, principalement parce qu'il se retrouve dans les milieux naturels. Autrement, les polymères pétrochimiques et les bioplastiques présentés peuvent terminer leur cycle de vie par le recyclage, la fragmentation, la biodégradation ou le compostage industriel.

1.8.1 Recyclable

Le recyclage des produits plastiques au Québec atteint seulement 18 % selon les statistiques de 2015, soit 41 000 tonnes métriques de matières plastiques mixtes, dominées par le PE (Recyc-Québec, 2015). De plus, plusieurs milliers de tonnes métriques ont simplement été exportées

afin d'être traitées ailleurs, incinérées dans un pays étranger, dans certains cas (Parker, 2017). Le recyclage du plastique comporte plusieurs défis qui contribuent au faible taux de recyclage réel, au Québec comme ailleurs (Parker, 2017). Le faible coût de production des matières plastiques en comparaison des coûts engendrés par la récupération, le traitement et le recyclage de la même matière est le premier défi auquel les entreprises de recyclage doivent faire face (University of Cambridge, 2006).








Symbol	Acronym	Full name and uses
	PET	Polyethylene terephthalate - Fizzy drink bottles and frozen ready meal packages.
	HDPE	High-density polyethylene - Milk and washing-up liquid bottles
	PVC	Polyvinyl chloride - Food trays, cling film, bottles for squash, mineral water and shampoo.
	LDPE	Low density polyethylene - Carrier bags and bin liners.
	PP	Polypropylene - Margarine tubs, microwaveable meal trays.
	PS	Polystyrene - Yoghurt pots, foam meat or fish trays, hamburger boxes and egg cartons, vending cups, plastic cutlery, protective packaging for electronic goods and toys.
	Other	Any other plastics that do not fall into any of the above categories. For example melamine, often used in plastic plates and cups.

Figure 1.14 Illustration du classement des matières plastiques pour le système de récupération (tiré de : Cambridge University, 2006)

Une autre problématique justifiant le faible taux de recyclage de la matière plastique est le fait que ces matières sont mélangées dans l'étape de récupération. Cela fait en sorte qu'il est difficile d'obtenir un produit vierge, à moins d'utiliser davantage de ressources dans la phase de tri, entre la récupération et le recyclage (University of Cambridge, 2006). La figure 1.14 démontre la différence importante des matières plastiques qui se retrouvent ensemble lors de la collecte sélective et le défi que les usines de recyclages ont à relever afin de produire des matières plastiques commercialisables.

1.8.2 Fragmentation

Les polymères biofragmentables ou fragmentables consistent en des polymères pétrochimiques traditionnels auxquels des agents facilitant la fragmentation post-utilisation ont souvent été ajoutés (ter Halle et al., 2016). Cette fragmentation est généralement causée par les rayons UV du soleil qui brisent les particules de plastiques en plus petites, sans toutefois réellement dégrader le produit au niveau moléculaire (ter Halle et al., 2016). Lorsqu'une matière plastique est dite fragmentable, cela signifie que les morceaux qui sont brisés par les éléments naturels ne sont pas complètement dégradés par les microorganismes et qu'ils vont ainsi persister dans l'environnement (ter Halle et al., 2016).

Certains types de polymère sont inclus dans cette catégorie, comme les oxodégradables et oxobiodégradables, bien qu'aucune preuve de l'efficacité de la dégradation ce type de plastique ne permette de les considérer comme biodégradables (ter Halle et al., 2016). Un plastique biofragmentable ne permet pas de dire qu'il ne sera plus présent dans l'environnement, mais seulement que ce dernier sera présent en fragments dans les milieux naturels.

1.8.3 Biodégradabilité

Un bioplastique peut être biosourcé, biodégradable, ou encore les deux en même temps. Le terme biodégradable n'est pas clairement défini dans la mesure où il est appliqué à des matières complètement différentes, aux caractéristiques extrêmement variées, à des endroits différents (Kershaw, 2015).

Pour cette étude, la définition qui s'applique est celle du standard européen EN 13432, qui définit un plastique biodégradable comme une matière qui subit des changements importants dans sa structure sous l'effet de l'action de microorganismes (Kirilovs et al., 2015). La norme établit également que 60 % de la masse du plastique doivent être biodégradés dans une période maximale de 6 mois (Kirilovs et al., 2015).

Il est important de spécifier qu'un plastique biodégradable ne doit pas se retrouver dans la nature davantage qu'un plastique pétrochimique. Pour être biodégradée par l'action de bactéries en milieu favorable aérobie, la dégradation biologique de la matière plastique doit seulement produire de la matière organique, de l'eau et du dioxyde de carbone (Kershaw,

2015). Au contraire, en milieu anaérobie, la réaction produira également du méthane (CH₄) (Adamcová et al., 2017). La différence principale entre le bioplastique compostable et le plastique biodégradable est seulement le facteur temporel. Le bioplastique compostable doit être dégradé à 90 % sur une échelle de temps de 6 mois, comparativement aux bioplastiques biodégradables qui, selon la définition du standard européen, doivent être dégradés à 60 % dans une période de 6 mois (Kershaw, 2015).

1.8.4 Compostable

Pour qu'une matière plastique soit considérée comme compostable, la matière en question doit être biodégradée à l'échelle de 90 % sur une période maximale de 6 mois (Adamcová et al., 2017). Le compostage ajoute simplement une étape à la biodégradation, qui consiste en la première phase du processus (Adamcová et al., 2017). La bioaccumulation est la seconde et dernière étape qui ne se produit pas avec la plupart des plastiques dits biodégradables (Adamcová et al., 2017). La figure 1.15 illustre bien l'intégralité des étapes et processus du compostage de matières plastiques.

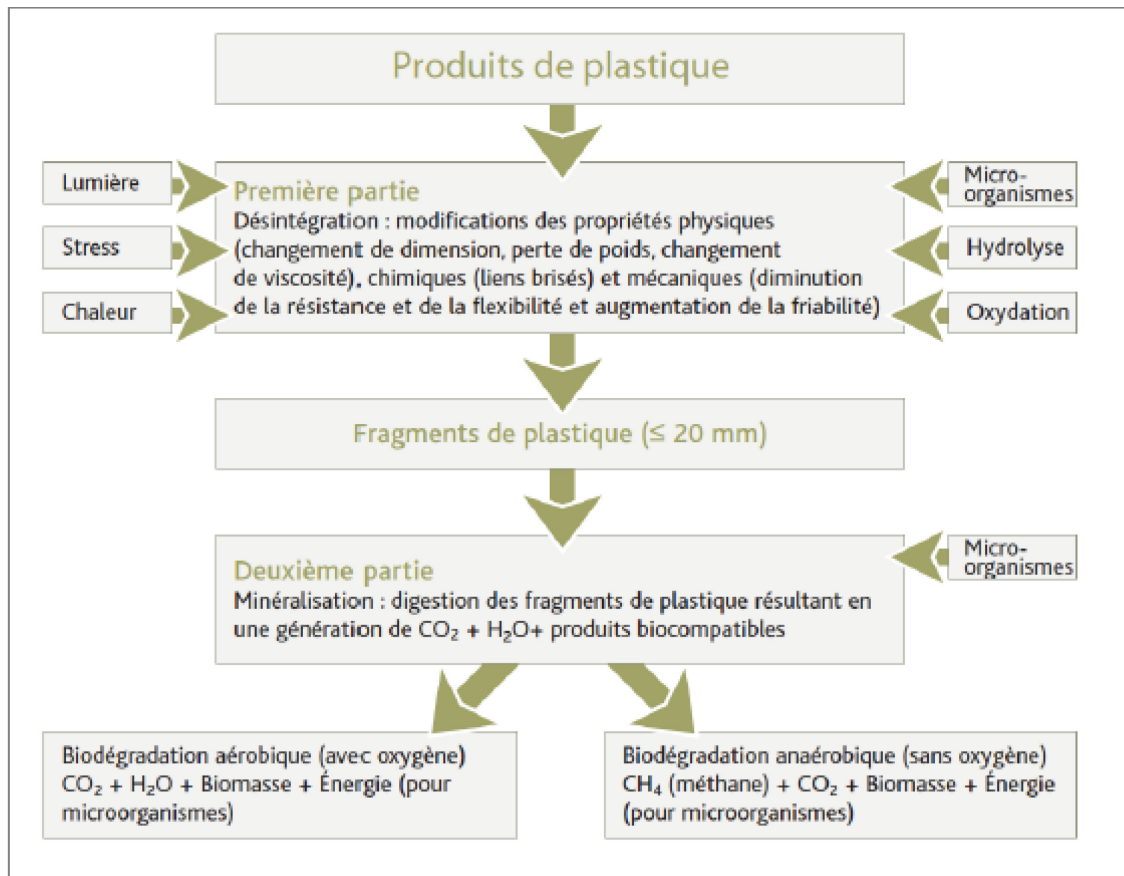


Figure 1.15 Processus de compostage de produits plastiques (tiré de : Taillefer, 2010)

Le processus de dégradation débute avec l'action de facteurs abiotiques sur la structure moléculaire du polymère, c'est-à-dire l'effet des rayons UV du soleil, de la température et de l'humidité. Comme il a été illustré, ces facteurs abiotiques altèrent les propriétés du polymère au niveau des liens chimiques du matériau. L'action de certains microorganismes sur des plastiques biodégradables peut survenir durant cette première étape du processus de dégradation du polymère. Lorsque ces molécules sont suffisamment altérées, une autre génération de microorganismes digère les fragments durant l'étape dite de minéralisation, se soldant en dioxyde de carbone ou méthane, en eau et en matières organiques. Différents microorganismes ou bactéries dégradent le polymère de manière différente dépendant si la réaction se produit avec ou sans oxygène (Adamcová et al., 2017). La dégradation sans oxygène, anaérobie, se complète plus rapidement que la biodégradation aérobie. Par contre, la réaction anaérobie produit du méthane qui doit subir une combustion pour se retrouver sous forme de dioxyde de carbone qui est moins polluant (Adamcová et al., 2017).

1.8.5 Compostage industriel

Le compostage industriel diffère du compostage traditionnel principalement en raison du fait que les températures atteintes sont plus élevées (Adamcová et al., 2017). Cela permet d'accélérer le processus de dégradation des matières biodégradables (Adamcová et al., 2017). Par exemple, la cellulose, bien que biodégradable, persiste plus longtemps que l'amidon (PLA) dans l'environnement, mais peut se dégrader plus rapidement dans un milieu de compostage industriel (Adamcová et al., 2017). Une autre alternative intéressante est l'intégration de certaines enzymes nécessaires à la dégradation de bioplastiques tout de même persistants dans l'environnement au compostage industriel. Par exemple, intégrer l'enzyme estérase pour la biodégradation complète et rapide de l'AC, un plastique biosourcé et compétitif en termes de caractéristiques, à des polymères comme l'ABS.

2. LA FIBRE DE CHANVRE

Dans le domaine des polymères, le chanvre est principalement utilisé pour sa fibre en tant que charge dans des matériaux composites thermoplastiques, de façon similaire à l'utilisation actuelle de la fibre de verre (Shahzad, 2012). De plus, les fibres de chanvre sont de plus en plus utilisées dans des composites plastiques en Europe et aux États-Unis, entre autres par des entreprises de véhicules automobiles telles que Mercedes et BMW, dans l'industrie aéronautique et pour la fabrication de produits textiles et de béton (Shahzad, 2012).

2.1 Synthèse de la cellulose

La cellulose est un polysaccharide synthétisé grâce à l'action de la photosynthèse réalisée par les végétaux (Festucci-Buselli et al., 2007). La synthèse d'une molécule de cellulose peut comprendre jusqu'à 3 000 molécules de glucose en chaîne (Festucci-Buselli et al., 2007). La formule chimique de cette transformation se produit en deux étapes, soit : $6 \text{ CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 6 \text{ O}_2 + \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{Amidon/Cellulose} + \text{H}_2\text{O}$ (Heinze et Petzold, 2008). Le processus débute avec du dioxyde de carbone et de l'eau que la plante fixe à l'aide de l'énergie solaire qu'elle absorbe (Heinze et Petzold, 2008). Cette première réaction chimique produit de l'oxygène et du glucose. Finalement, ce glucose est utilisé pour synthétiser de l'amidon, de la cellulose, ou encore les deux produits, en plus de l'eau. Il est possible d'obtenir le glucose de la cellulose, en chauffant cette dernière couplée avec de l'hydronium (H_3O^+) (Heinze et Petzold, 2008).

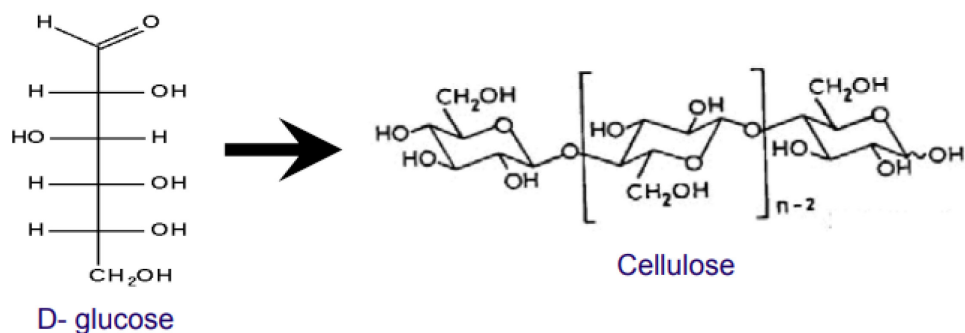


Figure 2.1 Structure moléculaire du D-Glucose et de la cellulose (tiré de : Festucci-Buselli et al., 2007)

La cellulose est reconnue pour être hautement insoluble dans l'eau en raison de sa structure cristalline et de sa masse moléculaire importante (Festucci-Buselli et al., 2007) (voir la structure moléculaire du D-Glucose et de la cellulose à la figure 2.1). Cependant, lorsqu'elle est utilisée comme charge dans un matériau composite, elle absorbe l'humidité une fois que les groupes hydroxyles forment des liens hydrogènes avec les molécules d'eau (Heinze et Petzold, 2008). Il s'agit d'une problématique dans l'usage à long terme de certains de ces matériaux, car les caractéristiques du thermoplastique peuvent être altérées de façon permanente si cette absorption est trop importante (Hargitai, Rácz et Anandjiwala, 2008).

2.2 Propriétés de la cellulose

La fibre de chanvre est constituée de 75 % de cellulose, 20 % d'hémicellulose et de 3 % de lignine, en plus de la présence de pectine et de cire (Shahzad, 2012). Celle-ci possède des caractéristiques qui sont similaires aux fibres synthétiques utilisées dans le milieu industriel (Shahzad, 2012). En effet, certaines fibres synthétiques comme la fibre de verre, de carbone, d'aramide et de kevlar sont comparées à la fibre de chanvre sous divers paramètres, et ce, dans plusieurs études (Shahzad, 2012). La figure suivante illustre la densité, la résistance à la traction et le module d'élasticité des différents types de fibres synthétiques et de cellulose.

Tableau 2.1 Propriétés de fibres de cellulose et de fibres synthétiques (tiré de : Fan, 2010)

Fibre	Specific gravity (kg/cm ³)	Specific TS (GPa)	Specific E (T) (GPa)
Plant	800 (600-1200)	2.31 (1.6-3.0)	65 (10-130)
Glass	2600	1.35	30
Kevlar	1400	2.71	90
Carbon	1800	1.71	130

La fibre de cellulose n'est pas aussi performante que les fibres synthétiques dans tous les paramètres, mais est toutefois similaire à celles-ci. Les propriétés de la fibre « plant » du tableau 2.1 représentent la fibre de cellulose de chanvre (Fan, 2010).

Une limite majeure de l'utilisation de la fibre de cellulose dans les matériaux composites est la dégradation de sa structure à une certaine température (Hargitai et al., 2008). En effet, la

cellulose commence à se dégrader entre 190 °C et 210 °C, ce qui fait en sorte que le polymère employé comme matrice ne doit pas nécessiter des températures plus élevées que 200 °C dans sa mise en forme (Kirilovs et al., 2015). Le polypropylène est une matrice compatible dans la mesure où la température de fusion de ce polymère se situe entre 145 °C et 175 °C (Hargitai et al., 2008).

2.3 Aspects environnementaux

Le chanvre offre l'avantage de séquestrer du carbone atmosphérique dans son cycle de vie. Une fois récoltée, une tonne de cellulose sèche de chanvre consiste en 0,45 t de CO₂ atmosphérique stocké (United States Environmental Protection Agency [EPA], 1995). Cette réduction de gaz à effet de serre (GES) est significative compte tenu de la rapidité avec laquelle le chanvre croît, de la forte densité de population en culture et des faibles impacts environnementaux de l'exploitation du chanvre (Anum Laate, 2016). Cependant, la production du chanvre requiert l'utilisation de combustibles fossiles, de la culture à la transformation des fibres, équivalant à 0,64 kg éq. CO₂ par kilogramme de fibres (Shahzad, 2012). En soustrayant le taux de fixation du carbone atmosphérique, le chanvre a donc une empreinte carbone globale de 0,19 kg éq. CO₂ par kilogramme de fibres (Shahzad, 2012).

Tableau 2.2 Paramètres environnementaux de la production de 1 kg de fibres de chanvre
(tiré de : Shahzad, 2012)

Parameters	Hemp fiber	Glass fiber
Power consumption (MJ)	3.4	48.3
CO ₂ emission (kg)	0.64	20.4
SO _x emission (g)	1.2	8.8
NO _x emission (g)	0.95	2.9
BOD (mg)	0.265	1.75

Le tableau 2.2 illustre également la demande énergétique pour la production d'un kilogramme de fibres de chanvre qui s'élève à 3,4 MJ/kg (Shahzad, 2012). Il a été démontré précédemment que la fibre de chanvre possède des propriétés mécaniques similaires à celles de la fibre de verre ; néanmoins, il est possible de remarquer la différence importante quant à l'empreinte

environnementale de ces deux types de fibres. En effet, la fibre de verre nécessite 14 fois plus d'énergie et est responsable de près de 32 fois plus d'émissions de GES pour la même quantité de fibres (Shahzad, 2012).

Certains types de fibres, telle la cellulose, peuvent être traités de façon chimique dans le but d'augmenter la stabilité de la structure moléculaire en permettant aux groupes hydroxyles de se lier chimiquement à la matrice (Hargitai et al., 2008).

2.4 Aspect économique

Le prix pour la fibre de cellulose de chanvre sur le marché mondial est en dessous de celui des fibres synthétiques, avec une moyenne de 1,40 \$ US/kg de fibres (Anum Laate, 2016). À l'opposé, la fibre de verre a une valeur de plus du double à l'achat, soit environ 4,41 \$ US/kg et 11,02 \$ US/kg pour la fibre de carbone (Kirilovs et al., 2015).



Figure 2.2 Coûts de production de la culture du chanvre au Canada en 2015 (tiré de : Alberta Agriculture and Forestry, 2016)

La figure 2.2 affiche les coûts de production pour la culture du chanvre, qui varient selon le type de terrain, des efforts et de l'investissement des agriculteurs (Anum Laate, 2016). Le coût de production moyen au Canada varie entre 409 \$ et 574 \$ par acre de culture (Anum Laate, 2016). Le fait que les agriculteurs aient l'habitude d'ajouter des fertilisants et produits chimiques de façon périodique, et non seulement lorsqu'il y a nécessité, contribue de 26 à 36 % aux frais de

production (Anum Laate, 2016). Le coût relié à ces activités s'élève à 150 \$ par acre et est inclus dans le coût de production total, mais pourrait être diminué considérablement en modifiant les techniques de culture à ce niveau (Anum Laate, 2016). Les revenus nets d'un cultivateur de chanvre au Canada varient de 405 \$ à 768 \$ par acre, en considérant qu'environ 100 acres sont cultivés (Anum Laate, 2016).

3. ACÉTATE DE CELLULOSE (AC)

L'AC et le butyrate d'acétate de cellulose (BAC) sont des thermoplastiques biosourcés produits par l'estérification de molécules de celluloses (Choi et al., 2004). Le BAC se distingue de l'AC, d'abord par son prix plus élevé, mais aussi par sa plus faible absorption d'humidité (Ouajai et Shanks, 2009).

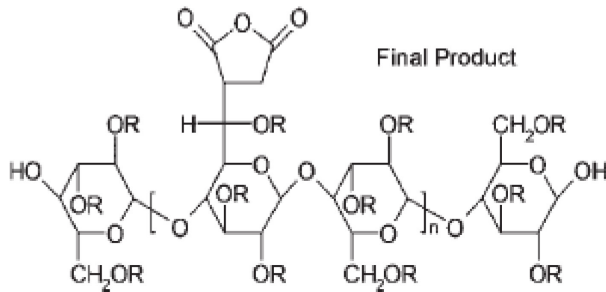


Figure 3.1 Structure finale du butyrate d'acétate de cellulose (tiré de : Wibowo et al., 2006)

Le BAC a également une plus belle apparence, utile pour la fabrication de produits qui nécessitent une grande transparence et une résistance plus élevée à certains types d'expositions (Wibowo et al., 2006). Le propionate d'acétate de cellulose (PAC) est synthétisé en utilisant de l'acide propanoïque plutôt que de l'anhydride acétique (Wibowo et al., 2006).

3.1 Propriétés

Les propriétés de l'AC ont été comparées dans le tableau 3.1 sous les différentes formes présentées. La section 3.5 présentera certains de ces paramètres pour de l'AC renforcé par de courtes fibres de chanvre.

Tableau 3.1 Propriétés de l'acétate de cellulose et de ses variétés (inspiré de : Material Properties Database, 2009c, 2009a, 2009b)

Type	TS MPa	FS GPa	TM GPa	Charpy kJ/m ²	Allongement à la rupture	Densité g/cm ³	TTV (°C)	Dureté	Humidité (%)
AC	30	55	1,7	20	35 %	1,28	200	RR71	2,2
BAC	35	N/D	1,3	26	60 %	1,18	200	RR69	1,3
PAC	35	N/D	1,76	13	60 %	1,22	215	RR94	1,8

Légende : **TS** : Résistance à la traction ; **FS** : Résistance à la flexion ; **TM** : module d'élasticité ;
TTV : température de transition vitreuse

Le tableau 3.1 inclut les paramètres du BAC et du PAC, qui démontrent une plus grande résistance à la traction (TS) et à l'allongement à la rupture, tout en ayant une plus faible absorption d'humidité. En revanche, la densité, la résistance au test Charpy et la résistance à la flexion ne sont pas significativement supérieures, voire inférieures. La température de transition vitreuse (TTV) est sensiblement la même, tout comme le module d'élasticité (TM) qui est inférieur seulement pour le BAC. Il est fondamental de connaître les paramètres qui doivent être performants lorsqu'un de ces polymères est utilisé pour concevoir un produit de marchandise, car le prix de production du PAC et du BAC est significativement supérieur au AC traditionnel (Wibowo et al., 2006).

3.2 Structure et synthèse

La synthèse de l'AC débute avec l'estérification des chaînes moléculaires de la cellulose, qui substitue les groupes hydroxyles en groupes acétates (Tayeb, 2013). Pour ce faire, le procédé moderne nécessite l'utilisation d'anhydrides d'acide (Tayeb, 2013). Avant de débiter le processus, la cellulose doit subir des traitements mécaniques et chimiques pour lui permettre d'avoir une plus grande réactivité. Ces traitements consistent à sécher, broyer et à finalement mélanger le produit avec de l'acide acétique (Tayeb, 2013). Par la suite, à la solution est ajouté de l'anhydride acétique pour dissoudre la cellulose broyée (Tayeb, 2013). Cette étape conduit à l'hydrolyse et de la substitution des groupes hydroxyles de la cellulose (Tayeb, 2013). De l'eau est ajoutée à la solution pour compléter l'hydrolyse amorcée à l'étape d'acétylation (Tayeb, 2013). L'ajout d'anhydride acétique, ayant permis de former du triacétate de cellulose,

l'hydrolyse le divise par la suite en diacétate de cellulose, avant d'être précipitée et récupérée (Tayeb, 2013).

La structure de départ de la cellulose et la structure finale de l'AC sont illustrées ci-dessous, avec le groupement d'anhydride acétique au centre qui modifie la structure de la molécule (Tayeb, 2013).

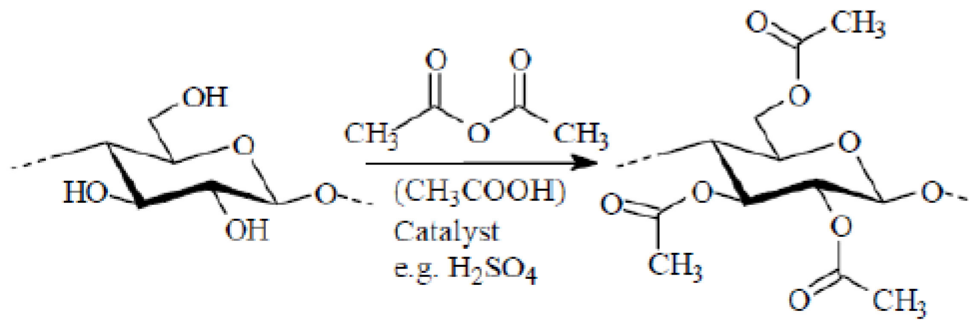


Figure 3.2 Illustration de l'acétylation de la cellulose en acétate de cellulose (tiré de : Tayeb, 2013)

Cette modification de structure se solde par une molécule qui possède trois groupes hydroxyles formant des liens avec les autres molécules d'AC pour former le polymère thermoplastique final (Tayeb, 2013).

3.3 Dégradation et impacts sur l'environnement

Des études ont démontré que l'AC peut être biodégradé selon certaines conditions (Puls et al., 2011). Lors de sa dégradation, l'AC subit une acétylation par un groupe d'enzymes présent chez certains microorganismes, dont l'estérase et l'hydrolase, comme lors de la dégradation de la cellulose (Puls et al., 2011).

La biodégradation de l'AC peut se produire dans un milieu aérobie ou anaérobie, mais nécessite un taux d'humidité élevé, une température supérieure à 0 °C et la présence de microorganismes spécifiques (Puls et al., 2011). Il a été démontré que dans un milieu naturel favorable, l'AC est biodégradé à un taux de 65 % sur une durée de quatre à six mois (Puls et al., 2011). Dans un milieu de compostage industriel et d'incubateurs, l'AC peut être biodégradé en quelques jours

dans une réaction endothermique, procurant une énergie propre dans la conclusion du cycle de vie du polymère (Puls et al., 2011). En effet, en incubateur industriel non enrichi, l'AC nécessite 2 mois pour voir 50 % de sa masse dégradée (Puls et al., 2011). En bioréacteur enrichi, le polymère est complètement biodégradé en 1 mois, et en compostage industriel aérobie enrichi, l'AC est dégradé à 67 % de sa masse en 3 semaines (Puls et al., 2011). Finalement, il n'y a plus de traces du polymère au bout de 7 à 18 jours dans un centre de compostage enrichi anaérobie (Puls et al., 2011). Il n'y a cependant pas d'études scientifiques accessibles dont les résultats permettent d'affirmer que l'AC est un polymère qui serait biodégradable dans un milieu naturel, sans facteurs de renforcement.

L'AC a une empreinte carbone plutôt faible due au fait que la ressource utilisée, la cellulose, comprend du carbone atmosphérique emmagasiné par les végétaux (Shen, 2011). Le volume d'émissions de GES relié à la production d'AC est supérieur à celui des fibres de cellulose de chanvre, car le processus de synthèse nécessite des combustibles fossiles pour obtenir la chaleur nécessaire à la réaction (Shen, 2011). Au total, la production d'AC entraîne l'émission de 0,45 t éq. CO₂/t de thermoplastique (Shen, 2011).

Finalement, la demande énergétique pour la synthèse de ce type de bioplastique est supérieure à celle des polymères pétrochimiques traditionnels (EPA, 1995). L'énergie que requiert la production varie entre 17,2 kWh/kg et 40,4 kWh/kg en fonction du type d'AC produit. Pour les besoins de l'étude, la valeur médiane sera utilisée, soit 29 kWh, qui équivaut à 104 MJ. L'énergie nécessaire à la culture de la ressource est intégrée dans le calcul d'estimation (EPA, 1995).

3.4 Coût et situation économique

L'AC est encore présent sur le marché à un prix situé entre 2,58 et 4,41 \$ US/kg de polymère avec une moyenne de 3,50 \$ US /kg (Accuray Research LLP, 2017). En incluant 30 % du poids total du composite de l'AC avec des fibres de chanvre, le prix se situerait entre 2,23 et 3,51 \$ US/kg de matériau. La cellulose possède l'avantage d'être une ressource où la volatilité des prix n'est actuellement pas un facteur déterminant contrairement au pétrole (Tayeb, 2013).

La hausse de la demande pour ce polymère a nécessité un ajustement de l'industrie causé par une offre significativement inférieure à la demande en 2011, 2013 et 2015 (Zion Market

Research, 2018). Parmi les cinq principaux producteurs, deux sont aux États-Unis, deux au Japon et en Chine, bien que l'Espagne soit le deuxième plus grand exportateur, entre la Chine au premier rang et le Japon en troisième position (Zion Market Research, 2018). Cela se justifie par le fait que les États-Unis exportent peu de la production interne, principalement parce que la main-d'œuvre est plus coûteuse et ne peut rivaliser en termes de prix avec certains pays nouvellement industrialisés (Zion Market Research, 2018).

La demande pour l'AC a augmenté considérablement durant la dernière décennie, atteignant 4,82 milliards \$ US en 2015 (Zion Market Research, 2018). En 2016, une estimation de la demande a été calculée par des études de marché, et elles prédisent qu'en 2021 la demande aura augmenté d'environ 34 %, ce qui équivaut à une hausse de 6,8 % (voir figure 3.3) (Zion Market Research, 2018).

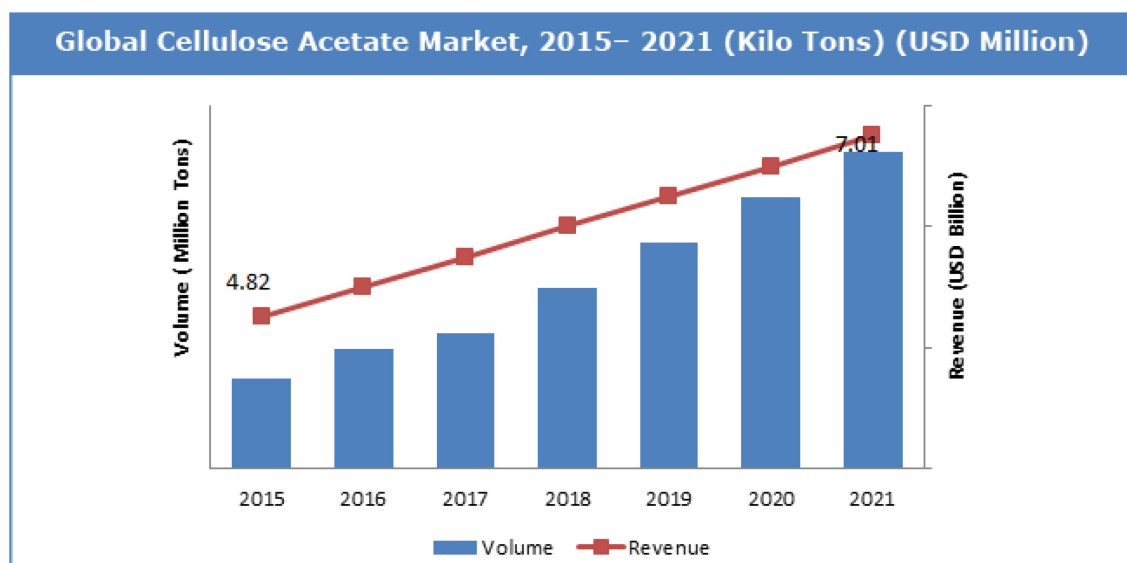


Figure 3.3 Estimation de la croissance du marché de l'acétate de cellulose à partir des données de 2015 (tiré de : Zion Market Research, 2018)

La demande pour les produits de l'AC augmente dans les produits déjà en marché, tels les filtres de cigarettes, mais également dans des domaines émergents, en biotechnologie et en pharmaceutique (Zion Market Research, 2018).

3.5 Composites d'acétate de cellulose et chanvre

Lors d'une étude américaine produite en 2004, des chercheurs ont tenté de développer un bioplastique d'origine entièrement végétale et naturelle, incluant des additifs biodégradables (Wibowo et al., 2004). La problématique avec le développement du plastique de chanvre est d'utiliser une matrice performante, adhérente aux fibres, mise en forme sous 200 °C, biodégradable et biosourcée. Dans cette étude, il a été proposé d'utiliser une matrice en AC, synthétisée à partir de résidus de bois (Wibowo et al., 2004).

Deux processus de mise en forme du thermoplastique sont utilisés afin de comparer leur efficacité avec ce type de polymère (Wibowo et al., 2004). Le processus 1 consiste à intégrer des additifs plastifiants et à mettre en forme les échantillons en moulage par compression à une température de 195 °C et à une pression de 1,1 MPa durant 12 minutes (Wibowo et al., 2004). Le processus 2 consiste également à ajouter un additif plastifiant, mais utilise la mise en forme par extrusion (Wibowo et al., 2004). Le mélange a été maintenu à une température inférieure à 195 °C et à une pression de 10 MPa. Les essais ont été effectués sur des échantillons mis en forme par les deux processus, certains vierges de fibres et d'autres qui contiennent 30 % du poids total en fibres de chanvre (Wibowo et al., 2004). Tous les échantillons utilisés étaient de même dimension, soit 18 cm sur 14 cm avec une épaisseur de 0,15 cm, et selon les normes ASTM établies (Wibowo et al., 2004).

La figure 3.4 illustre l'impact général qu'ont les fibres de chanvre sur certaines caractéristiques du polymère. Le graphique de gauche est une représentation des résultats des tests de résistance et du module de flexion. Le graphique du centre est une représentation des résultats du test Charpy et celui de droite des propriétés de résistance et du module de flexion, incluant celles du PP et du PP renforcé avec des fibres de chanvre.

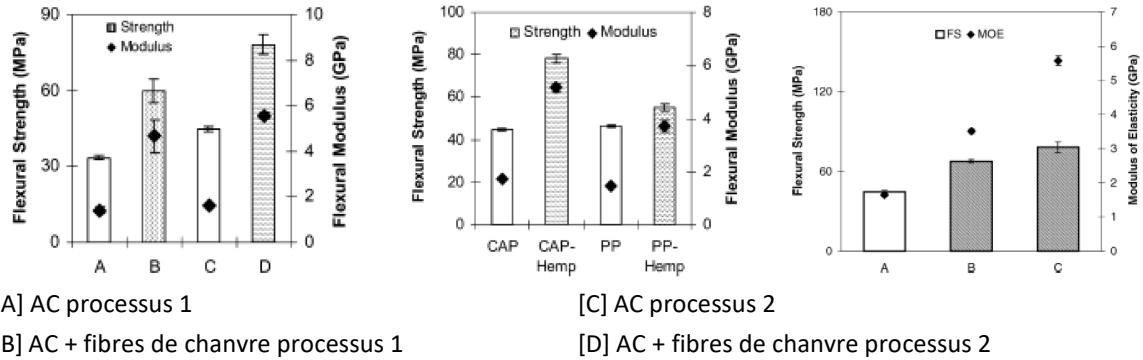


Figure 3.4 Résultats des essais de force de flexion, du module de flexion et du test Charpy
(tiré de : Wibowo et al., 2004 et Mohanty et al., 2004)

Le graphique de gauche illustre que les fibres de chanvre semblent posséder de meilleures propriétés de résistance à la flexion lorsqu'elles sont mises en forme par le processus 2. Le procédé d'extrusion permet par contre de créer une plus forte adhésion entre les fibres et la matrice, ce qui justifierait la meilleure adhésion des fibres avec la matrice (Wibowo et al., 2004). Le graphique du centre démontre les résultats obtenus lorsque le chanvre est intégré à une matrice de PAC en comparaison à un composite de PP et de fibres de chanvre non traitées (Wibowo et al., 2004). Finalement, le graphique de droite présente le module d'élasticité des échantillons d'AC et de ses composites en chanvre (Wibowo et al., 2004). L'échantillon A ne possède pas de fibres de chanvre et affiche une plus grande élasticité que les échantillons B et C, qui sont composés respectivement de 15 % et 30 % de fibres de chanvre (Mohanty et al., 2004).

Finalement, l'allongement à la rupture du composite d'AC possédant 30 % de fibres de chanvre est de 5 % et sa température de transition vitreuse de 127 °C (Mohanty et al., 2004).

3.6 Résumé de l'AC

Le tableau 3.2 résume les points importants exposés au chapitre 3. L'AC est un bioplastique, un des premiers types de thermoplastique développés et commercialisés. Ce polymère a été progressivement substitué par l'ABS pour la plupart de ses utilisations. De ce fait, l'AC possède des propriétés similaires à l'ABS, mais son prix est plus élevé.

Tableau 3.2 Résumé des éléments principaux de l'AC

Polymère	TS (MPa)	FS (MPa)	TM (GPa)	Émissions (t éq. CO ²)	Besoin énergétique	Prix (\$ US/kg)
AC	30	55	1,7	3,46/t	104 MJ/kg	3,50

L'AC affiche des paramètres environnementaux avantageux au niveau de son empreinte carbone, cependant, sa production est celle qui requiert la plus grande quantité d'énergie en comparaison avec les autres polymères étudiés dans cet essai. L'AC semble être une matrice pour composite de chanvre prometteuse en raison de sa plus grande adhésion avec les fibres de renfort.

4. ACIDE POLYLACTIQUE (PLA)

Le PLA est un bioplastique biosourcé fabriqué à partir de sucre de provenance végétale (Guo et Crittenden, 2011). Les végétaux au plus grand potentiel de production sont le maïs, la pomme de terre, la betterave et la canne à sucre (Castro-Aguirre et al., 2016). Ce polymère a augmenté sa part de marché dans les dernières années, à la suite d'une diminution de son coût de production et de la montée en popularité des bioplastiques. Le PLA peut être utilisé dans les domaines du médical, de l'emballage, de l'imprimante 3D, de l'industriel et du commercial (Guo et Crittenden, 2011).

4.1 Propriétés

Le PLA possède de nombreuses qualités sur les plans environnemental, médical et économique, mais ses caractéristiques physicochimiques limitent les possibilités d'utilisation de ce polymère. Les propriétés du PLA dépendent de la température de polymérisation et de sa masse moléculaire (Farah et al., 2016). Ces paramètres influencent notamment la cristallinité du polymère qui influence directement ses propriétés mécaniques (Farah et al., 2016). Le PLA destiné à l'utilisation dans le domaine médical nécessite une plus faible densité, donc une plus faible cristallinité, contrairement aux filaments de PLA à l'utilisation d'imprimantes 3D (Farah et al., 2016).

Tableau 4.1 Propriétés principales du PLA (inspiré de : Material Properties Database, 2009d)

Type	TS MPa	FS MPa	Tm GPa	Charpie kJ/m ²	Allongement à la rupture	Densité g/cm ³	TTV °C	Dureté	Humidité %
PLA	45	80	4,1	24	6 %	1,25	60	SD83	3

Légende : **TS** : Résistance à la traction ; **FS** : Résistance à la flexion ; **TM** : module d'élasticité ;
TTV : température de transition vitreuse

Le tableau 4.1 présente les propriétés du PLA, qui possède une densité et une dureté plus élevées que la plupart des bioplastiques, respectivement de 1,25 g/cm³ et de 83 (Shore D) (Farah et al., 2016). Les paramètres mécaniques du PLA sont similaires à ceux des thermoplastiques pétrosourcés, particulièrement à l'ABS, dépassant sa résistance à la traction et à la flexion de 48 et 50 MPa, ainsi qu'une résistance au test Charpy de 24 kJ/m². Cependant, le

PLA n'affiche pas une grande élasticité par le module d'élasticité de 3,8 GPa et d'allongement à la rupture à 6 % seulement. Un autre point faible du PLA est sa plus forte absorption d'humidité maximale de 3 % et sa température de transition vitreuse qui est nettement inférieure aux plastiques traditionnels.

Le PLA a l'avantage de pouvoir être mis en forme par le même type d'équipements que les thermoplastiques traditionnels, à condition de se limiter à une température d'environ 150 °C (Castro-Aguirre et al., 2016).

4.2 Structure et synthèse

Le monomère utilisé dans la polymérisation du PLA est l'acide lactique (AL) qui est obtenu à la suite d'une fermentation de sucres faite par certaines bactéries, particulièrement du genre des *Lactobacillus* (Castro-Aguirre et al., 2016). La fermentation se produit dans un milieu indiquant un pH entre 5,4 et 6,5 à une température d'environ 40 °C (Castro-Aguirre et al., 2016). Par la suite, l'acide lactique obtenu subit une distillation afin de purifier le produit d'acide sulfurique et autres impuretés (Castro-Aguirre et al., 2016). Le type de polymérisation peut varier selon la masse moléculaire qui est souhaitée, dépendant de l'utilisation qui sera faite du produit final (Castro-Aguirre et al., 2016). Pour la production de thermoplastiques, l'acide lactique qui a été distillé subit une polymérisation directe par condensation (Castro-Aguirre et al., 2016). Les monomères sont soumis à une température élevée et à une forte pression à l'intérieur de réactions dont la vapeur d'eau résultant de la condensation est évacuée. Pour évacuer la vapeur d'eau durant la polymérisation, des solvants et des catalyseurs sont intégrés à la solution (Castro-Aguirre et al., 2016). Par la suite, les molécules sont envoyées dans des appareils qui se chargent de condenser la solution, de la cristalliser et de la sécher afin d'obtenir les pastilles de PLA (Castro-Aguirre et al., 2016).

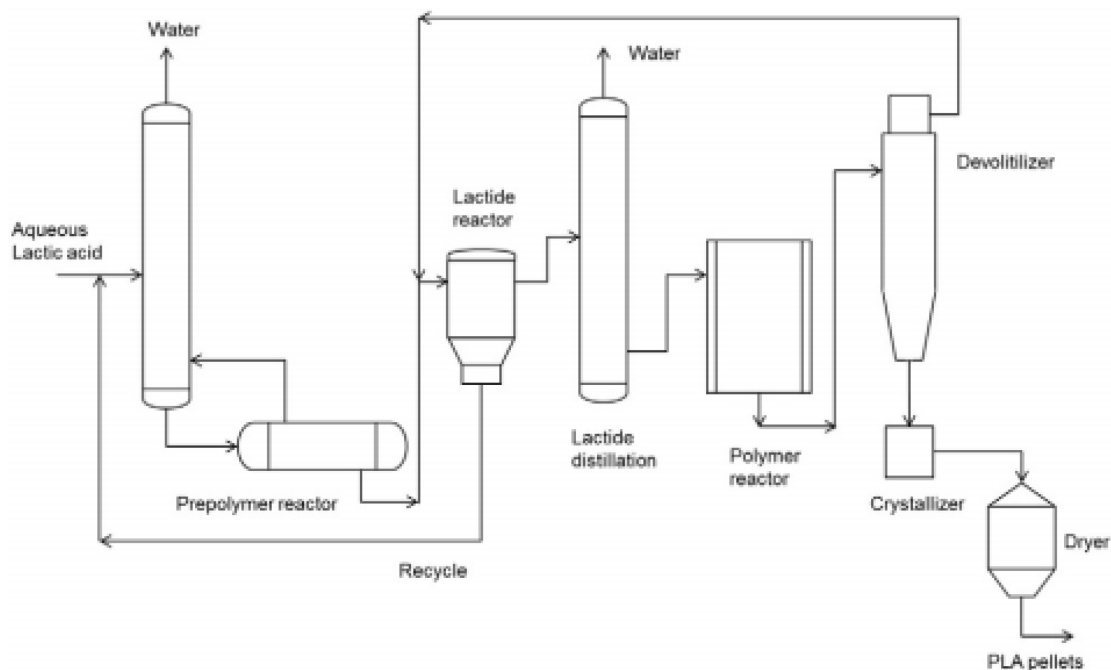


Figure 4.1 Schéma de la polycondensation du PLA (tiré de : Castro-Aguirre et al., 2016)

La figure 4.1 illustre le procédé modifié par l'entreprise *NatureWorks LLC* où l'étape de distillation et les précédentes sont ajoutées directement à la polymérisation directe par condensation pour éviter d'avoir à intégrer des solvants et pour réduire le nombre d'étapes (Castro-Aguirre et al., 2016). Ce procédé est possible sans solvant, car une solution qui a le même point d'ébullition que l'eau est utilisée sans que cela affecte la polymérisation des monomères (Castro-Aguirre et al., 2016).

Une fois en pastilles, le PLA peut être mis en forme par moulage par injection, thermoformage, extrusion et plusieurs autres techniques (Castro-Aguirre et al., 2016). Les pastilles sont simplement chauffées pour obtenir une résine qui est moulée et refroidie pour obtenir les produits désirés (Castro-Aguirre et al., 2016). La température de mise en forme varie en fonction de la masse moléculaire du PLA et des additifs utilisés, mais se situe entre 80 °C et 180 °C (Castro-Aguirre et al., 2016).

Malgré des avantages en termes de biodégradabilité et de l'utilisation d'une ressource renouvelable en tant que matière première, le PLA présente certains désavantages. Ce polymère est sensible aux milieux à teneur élevée en humidité et a une température de transition vitreuse

beaucoup plus faible que celle des thermoplastiques pétrochimiques (Castro-Aguirre et al., 2016).

4.3 Dégradation et impacts sur l'environnement

Le PLA est identifié 7 du code de récupération des plastiques (Plastics Insight, 2018 c). La dégradation du PLA a été étudiée dans plusieurs milieux, parmi lesquels une usine de traitement des eaux usées, un site d'enfouissement, une usine de compostage et d'un centre de compostage en laboratoire (Rudeekit et al., 2008). Les résultats des analyses sont résumés au tableau 4.2 ci-dessous.

Tableau 4.2 Synthèse des résultats des tests de dégradation du PLA (inspiré de : Rudeekit et al., 2008)

Milieu	Perte de masse	Temps
Traitement des eaux usées	20 %	15 mois
Site d'enfouissement	60 %	15 mois
Compostage industriel	100 %	34 jours
Compostage en laboratoire	86 %	120 jours

La dégradation du PLA en milieu de traitement des eaux usées a été l'environnement où la dégradation a été la moins importante (Rudeekit et al., 2008). La justification proposée par les chercheurs suggère que la température n'est pas suffisamment élevée pour favoriser l'hydrolyse du bioplastique en question, malgré une durée de 15 mois (Rudeekit et al., 2008). Le test de dégradation du PLA en milieu d'enfouissement s'est également effectué sur une période de 15 mois durant lesquels le polymère a perdu 60 % de sa masse moléculaire par biodégradation (Rudeekit et al., 2008). En milieu de compostage industriel, le polymère s'est fractionné de façon importante après 10 jours de compostage (Rudeekit et al., 2008). Lors de l'inspection, à la suite de 34 jours d'observation, le PLA ne semblait plus posséder de fragments visibles, ce qui laisse croire que la dégradation a été complétée (Rudeekit et al., 2008). Les chercheurs justifient le succès de cette méthode par la température plus élevée et le taux d'humidité appréciable (Rudeekit et al., 2008). La dégradation du PLA en milieu de compostage en laboratoire a été effectuée selon la norme ISO 14855-99 régissant la norme de CO₂ issu de la biodégradation qui

doit être libéré par unité de temps en se référant entre autres à la dégradation de la cellulose (RudeeKit et al., 2008). Une perte de poids de 86 % en 120 jours de compostage en laboratoire a été observée par les chercheurs (RudeeKit et al., 2008). Cependant, il a été remarqué que le PLA a atteint sa limite de dégradation après 96 jours de compostage en laboratoire (RudeeKit et al., 2008).

La production de PLA est nettement moins polluante en comparaison aux plastiques pétrosourcés (RudeeKit et al., 2008). En effet, le PLA a une empreinte carbone négative dans son cycle de vie net puisque la biomasse utilisée en tant que ressource est partiellement composée de carbone atmosphérique fixé en polysaccharides (Jamshidian, Tehrany, Imran, Jacquot et Desobry, 2010).

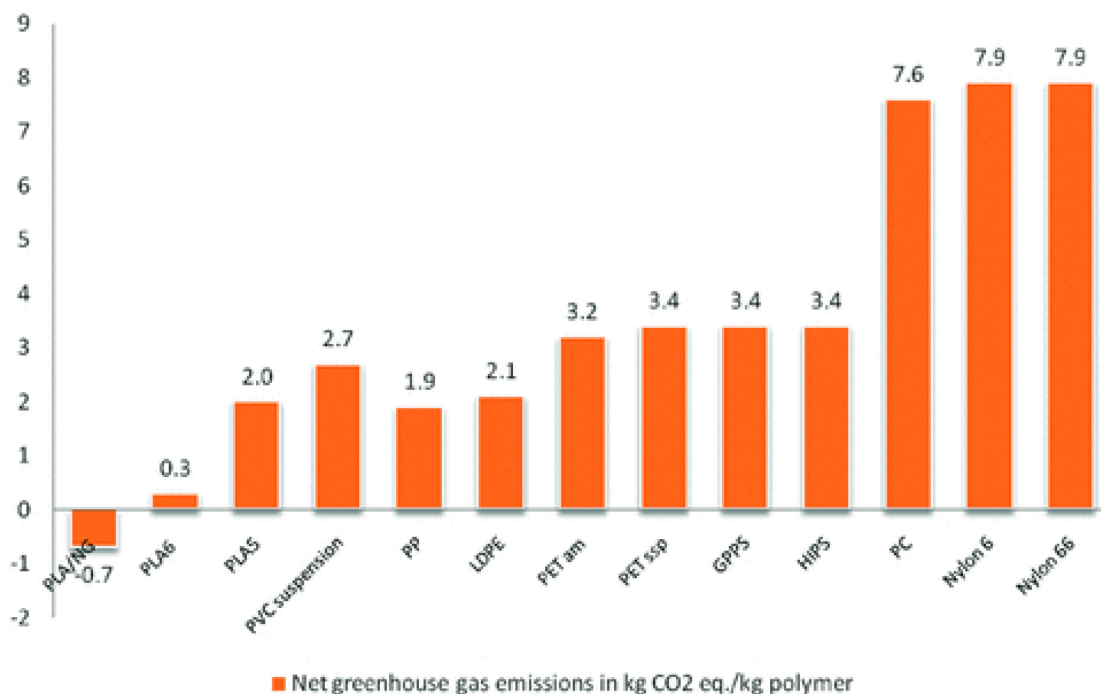


Figure 4.2 Comparaison des émissions de GES en kg éq. CO₂/kg de la production de certains polymères (tiré de : Jamshidian et al., 2010)

La figure 4.2 illustre que la production de PLA a un taux d'émissions de GES de -0,7 kg éq. CO₂/kg de polymère, soit nettement sous le taux d'émissions des plastiques pétrosourcés présentés. L'avantage que possèdent certains bioplastiques biosourcés est que le carbone doit être

emmagasiné dans la ressource pour être en mesure de l'extraire, contrairement aux plastiques biosourcés qui nécessitent une autre forme de ressource qui est sortie du cycle du carbone (Jamshidian et al., 2010). Cependant, la culture, la transformation et le transport du PLA ajoutent 1,2 t éq. CO₂/t de polymère, augmentant l'empreinte carbone globale du cycle de vie du thermoplastique à 0,5 t éq. CO₂/t (Reddy, Reddy et Gupta, 2013).

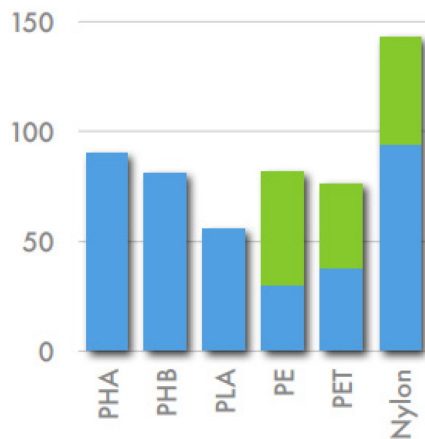


Figure 4.3 Consommation d'énergie en MJ/kg de différents polymères (tiré de : Cambridge University, 2006)

La figure 4.3 ci-dessus présente trois bioplastiques biosourcés — le PHA, PHB et PLA — ainsi que trois plastiques pétrosourcés, et la consommation d'énergie nécessaire à leur production en mégajoules par kilogramme de polymère produit. La figure 4.3 illustre que la production de PLA requiert une quantité d'énergie totale plus faible que les plastiques pétrosourcés avec 57 MJ/kg, les sections affichées en vert présentant l'équivalent énergétique du pétrole nécessaire aux plastiques pétrosourcés (Jamshidian et al., 2010). Cependant, la figure illustre également que le PLA nécessite une plus grande quantité d'énergie pour la transformation seulement. Il doit être mentionné que les sources de l'énergie consommée pour la production de polymères sont majoritairement des combustibles fossiles, beaucoup plus efficaces pour obtenir de l'énergie thermique que l'électricité (Jamshidian et al., 2010).

Un enjeu soulevé de la production de PLA est l'important besoin en eau que nécessitent les grandes cultures qui sont privilégiées, dont le maïs et la canne à sucre, soit d'environ huit gallons par kg de PLA (Guo et Crittenden, 2011).

4.4 Coût et situation économique

Le PLA a un coût de production moins élevé d'année en année, mais reste peu compétitif aux thermoplastiques pétrochimiques en raison des phases intermédiaires de transformation nécessaires à sa production (Plastics Insight, 2018 c).

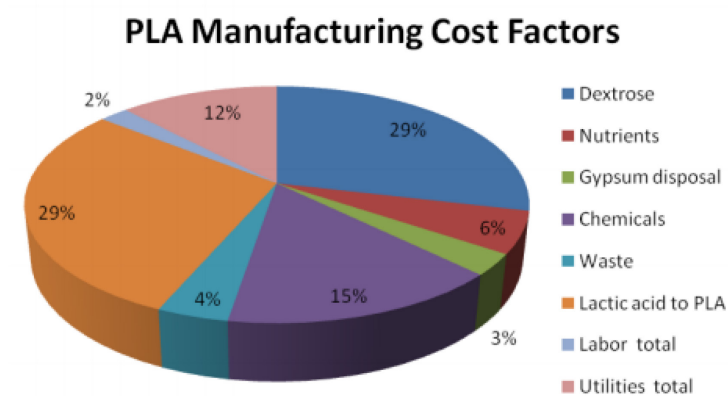


Figure 4.4 Illustration des différents coûts de production du PLA (tiré de : Belliveau, 2010)

Le dextrose et la transformation d'acide lactique en acide polylactique occupent la plus grande partie des coûts de production du PLA à près de 30 % chacun. Le prix du sucre aux États-Unis varie généralement de 0,20 à 0,38 \$ US/kg selon la source et la richesse, entre le maïs plus dispendieux et le bois au prix le plus bas (Belliveau, 2010).

Actuellement, le PLA se trouve à 1,98 \$ US/kg sur le marché aux États-Unis (Plastics Insight, 2018 c). Cependant, le marché en offre de plus en plus, passant de près de 150 000 t en 2011 à 700 000 t en 2018 (Plastics Insight, 2018 c).

La capacité mondiale de production de PLA s'élevait à 2,05 millions de tonnes en 2017 constituant 10,3 % du marché des bioplastiques (Plastics Insight, 2018 c). La demande est en constante augmentation, les exportations ayant augmenté de 60 % entre 2011 et 2016 au niveau mondial ; des études de marché estiment qu'elle augmentera de façon plus importante d'ici 2020 (Plastics Insight, 2018 c).

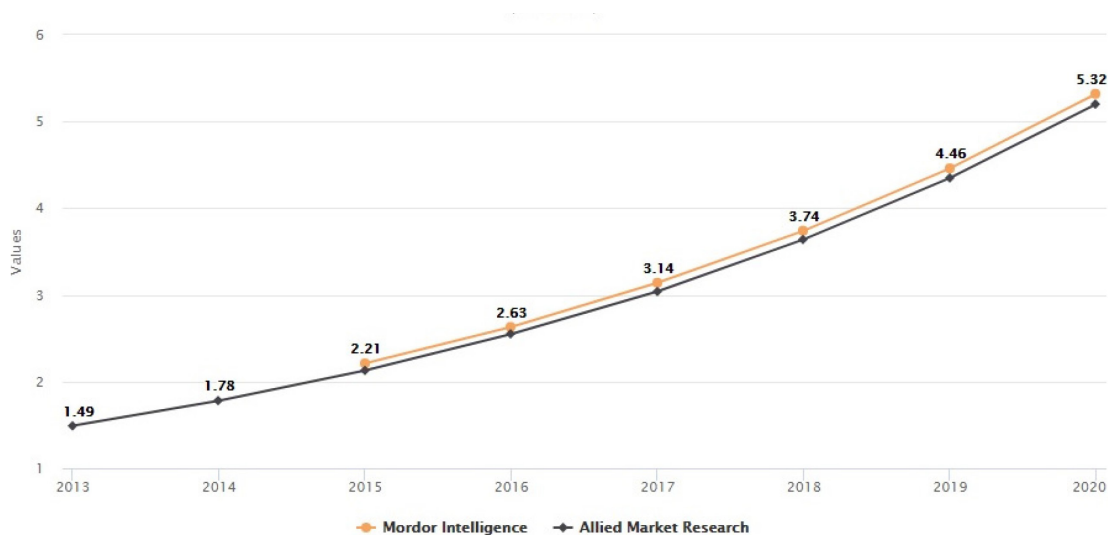


Figure 4.5 Prédictions de l'évolution du marché mondial de PLA en milliards \$ US

La figure 4.5 ci-dessus illustre la croissance estimée par deux firmes spécialisées en analyse de marché en incluant les données réelles de 2013 et 2014 (Plastics Insight, 2018 c). Selon les données réelles de ces deux années, la croissance de la valeur du marché du PLA est de 16 % (Plastics Insight, 2018 c).

4.5 Composite de PLA et chanvre

De nombreux matériaux composites ont été développés à partir du PLA, entre autres avec l'ajout de fibres de chanvre à différentes proportions (Hu et Lim, 2007). Les propriétés de ce type de composite ont été testées avec des échantillons contenant des fibres de chanvre traitées et d'autres non traitées (Hu et Lim, 2007). Les fibres traitées ont été immergées dans une solution alcaline d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 6 % de concentration (Hu et Lim, 2007). Les fibres sont ensuite rincées à l'eau désionisée et séchées (Hu et Lim, 2007). Les fibres non traitées ont simplement été immergées dans l'eau durant la même période et ont ensuite été séchées pour s'assurer que cette dernière étape n'affecte pas les résultats de l'étude (Hu et Lim, 2007). Les fibres ont ensuite été ajoutées au PLA, en couches alternant entre PLA et fibres de chanvre, pour obtenir l'échantillon de composite en feuille (Hu et Lim, 2007).

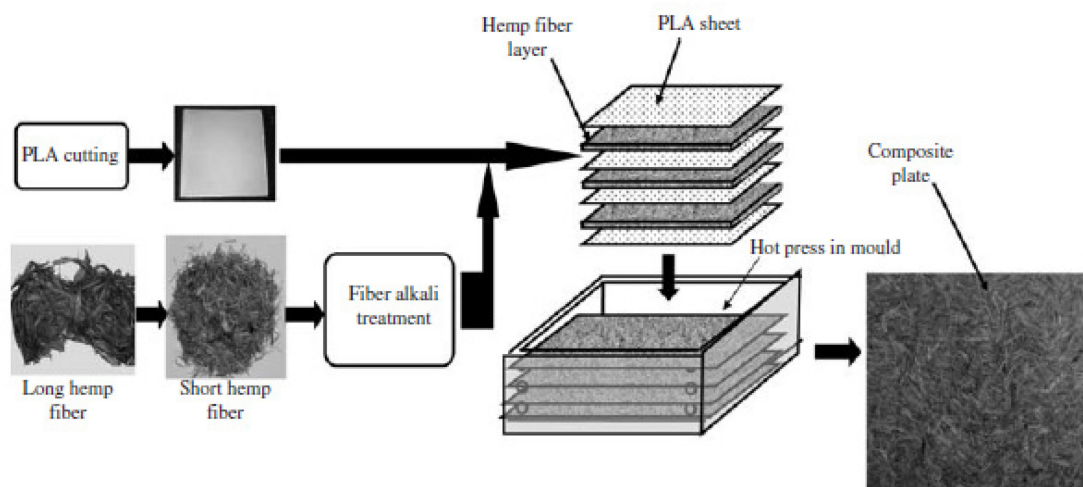


Figure 4.6 Schéma du processus de fabrication du composite de PLA renforcé de fibres de chanvre (tiré de : Hu et Lim, 2007)

Les longues fibres de chanvre sont broyées en courtes fibres de 5 à 15 mm de longueur et traitées dans la solution alcaline. Plusieurs échantillons de composite ont été testés, possédant chacun une concentration variable de fibres, soit 30, 40 et 50 % du poids total du composite (Hu et Lim, 2007).

Lors de cette étude, tous les tests de propriétés physicochimiques ont été effectués selon les normes ASTM et ISO établies pour s'assurer de la validité des résultats (Hu et Lim, 2007).

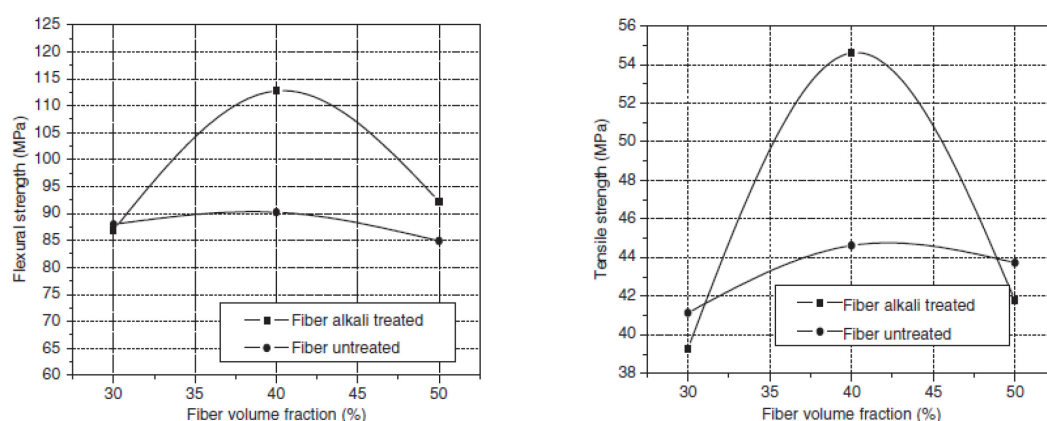


Figure 4.7 Résultats des tests de résistances effectués sur différents échantillons des composites de PLA et chanvre (tiré de : Hu et Lim, 2007)

La figure 4.7 illustre différentes propriétés testées sur des échantillons composites de PLA et chanvre produits pour l'étude. Les paramètres évalués semblent supérieurs lorsque les fibres de chanvre sont traitées dans une solution de NaOH, tout comme l'élasticité du polymère (Hu et Lim, 2007). Les plus grandes valeurs de résistance à la flexion et la tension ont été obtenues par l'échantillon contenant 40 % de fibres de chanvre traitées, avec 112,7 MPa et 54,6 MPa respectivement (Hu et Lim, 2007).

Également, l'allongement à la rupture a été évalué à 2 %, soit 4 % de moins que le PLA sans fibres de renfort, la température de transition vitreuse à 57 °C et une densité de 1,22 g/cm³ pour le composite, contre 60 °C et 1,25 g/cm³ pour le PLA sans fibres de renfort (Hu et Lim, 2007).

En résumé, les fibres de chanvre offrent l'avantage de ne pas affecter le caractère biodégradable du PLA (Hu et Lim, 2007). Il s'agit donc d'un composite entièrement biodégradable, avec une plus faible densité et des propriétés similaires aux composites contenant de la fibre de verre (Hu et Lim, 2007).

4.6 Résumé du PLA

Le tableau 4.3 ci-dessous illustre les éléments pertinents discutés au chapitre 4. Le PLA est un thermoplastique biosourcé, biodégradable, et il possède la plus grande part du marché des bioplastiques. Ce polymère possède des propriétés de résistance semblables à l'ABS et est employé pour les mêmes utilisations. Le PLA affiche une faible empreinte carbone dans son cycle de vie, selon les informations exposées à la section 4.3, sa production étant responsable de 0,5 t éq. CO₂/t de polymère.

Tableau 4.3 Résumé des éléments principaux du PLA

Polymère	TS (MPa)	FS (MPa)	TM (GPa)	Émissions (t éq. Co ²)	Besoin énergétique	Prix (\$ US/kg)
PLA	48	80	4	0,5/t	57 MJ/kg	1,98
Légende : TS : Résistance à la traction ; FS : Résistance à la flexion ; TM : module d'élasticité ;						

Le PLA affiche des paramètres environnementaux moins négatifs que les thermoplastiques pétrosourcés et même que l'AC. Les faibles impacts environnementaux reliés à la production de ce polymère ne semblent pas affecter ses propriétés mécaniques qui sont similaires, voire supérieures aux autres polymères étudiés. Cependant, il a été établi que le PLA possède certains désavantages quant à sa faible température de transition vitreuse et à son absorption d'humidité maximale relativement élevée.

5. POLYÉTHYLÈNE HAUTE DENSITÉ (PEHD)

Le PEHD est un thermoplastique de la famille des polyéthylènes (polyéthylène basse densité, polyéthylène haute densité et polyéthylène linéaire) (Glynwed, 2008). Ce polymère a été développé vers 1930 et est aujourd'hui le thermoplastique détenant la plus grande part de ce marché, avec plus de 80 t produites chaque année, soit plus de 70 % de la production mondiale (Glynwed, 2008). Le PEHD est utilisé pour la fabrication de nombreux produits dans les secteurs automobile, ménager, industriel et commercial (Glynwed, 2008). Les réservoirs d'essence, les contenants de plastique, les tubes de transport d'eau potable et d'isolation de câbles de télécommunication sont quelques exemples d'utilisation de ce matériau (Glynwed, 2008).

5.1 Propriétés

Le PEHD se distingue du polyéthylène basse densité (PEBD) par le taux de ramification des chaînes d'hydrocarbure synthétisées (Mark, 2009). La ramification des chaînes d'hydrocarbures fait en sorte que des liens sont créés dans la structure moléculaire ; celle-ci augmente ou diminue la densité du polymère obtenu (Mark, 2009). En effet, le PEHD a un plus faible degré de ramification, ce qui permet à la structure d'être constituée uniquement de longues chaînes d'hydrocarbure alignées plus près les unes des autres (Mark, 2009). Cette structure a une densité plus élevée que le PEBD, où de plus petites chaînes viennent se lier et ramifient davantage la structure du polymère (Mark, 2009). Cette caractéristique est directement liée à la résistance à la traction du PEHD qui est beaucoup plus importante (Mark, 2009).

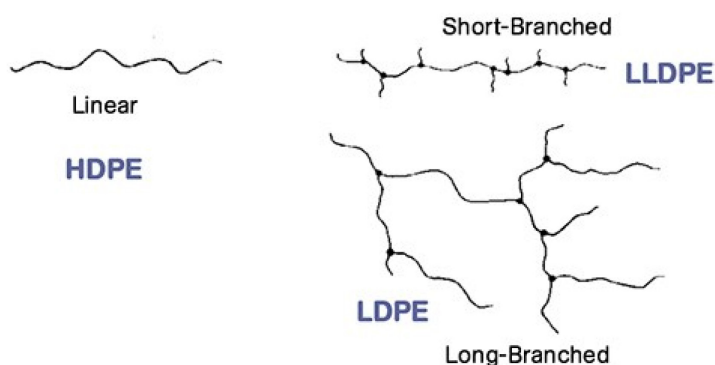


Figure 5.1 Représentation de la structure moléculaire de polyéthylènes (tiré de : Sepe, 2012)

La figure 5.1 démontre la différence de ramification des chaînes d'hydrocarbure des polymères de polyéthylène (PE). Le PEBD a de plus petites chaînes qui se fixent sur sa structure et causent les différences de caractéristiques du polymère avec le PEHD (Mark, 2009).

Le PEHD peut être mis en forme à partir de pastilles principalement par injection, extrusion, extrusion-soufflage ou encore par rotomoulage (Mark, 2009).

Tableau 5.1 Les propriétés principales du PEHD (inspiré de : Material Properties Database, 2009e)

Type	TS MPa	FS MPa	TM GPa	Charpie kJ/m ²	Allongement à la rupture	Densité g/cm ³	TTV (°C)	Dureté	Humidité (%)
PEHD	32	32	1,25	16	150 %	0,96	-110	SD68	0,02

Légende : **TS** : Résistance à la traction ; **FS** : Résistance à la flexion ; **TM** : module d'élasticité ;
TTV : température de transition vitreuse

Les propriétés contenues dans le tableau 5.1 rassemblent les mêmes que celles des bioplastiques présentés précédemment. D'abord, en comparaison, le PEHD possède une densité plus faible et une dureté plus élevée que celles de l'ABS, qui sont des caractéristiques importantes dans l'utilisation de ce dernier (Mark, 2009). Le PEHD a une résistance à la traction de 32 MPa, une résistance au test Charpy de 16 kJ/m² et un module d'élasticité de 1,25 GPa. La température de transition vitreuse du polymère est de -110 °C et le taux d'absorption d'humidité maximale de seulement 0,02 %. La valeur négative du TTV est causée par la structure moléculaire amorphe du polymère. Finalement, le polymère s'allonge de 150 % lors du test d'allongement à la rupture. Les paramètres chimiques ne sont pas illustrés dans ce tableau, mais le PEHD possède une grande résistance chimique, à l'exception des solvants chlorés (Mark, 2009).

Le PEHD biosourcé a exactement les mêmes propriétés que le PEHD pétrochimique, car les molécules utilisées sont identiques, la seule variance se situe dans la méthode pour le synthétiser (Mark, 2009).

5.2 Structure et synthèse

La synthèse du PE pétrosourcé nécessite plusieurs étapes, en commençant par la distillation (Glynwed, 2008). La distillation consiste à chauffer la matière première, le pétrole, jusqu'à 400 °C dans une colonne de fractionnement (Mark, 2009). Ce procédé permet de différencier les molécules contenues dans le pétrole en fonction de leur volatilité qui dépend de leur masse molaire (Mark, 2009). À la suite de cette distillation, le pétrole brut est divisé en neuf sous-produits, des molécules les plus lourdes (bitume) aux produits contenant un nombre d'atomes de carbone le plus faible (butane et propane) (Mark, 2009).

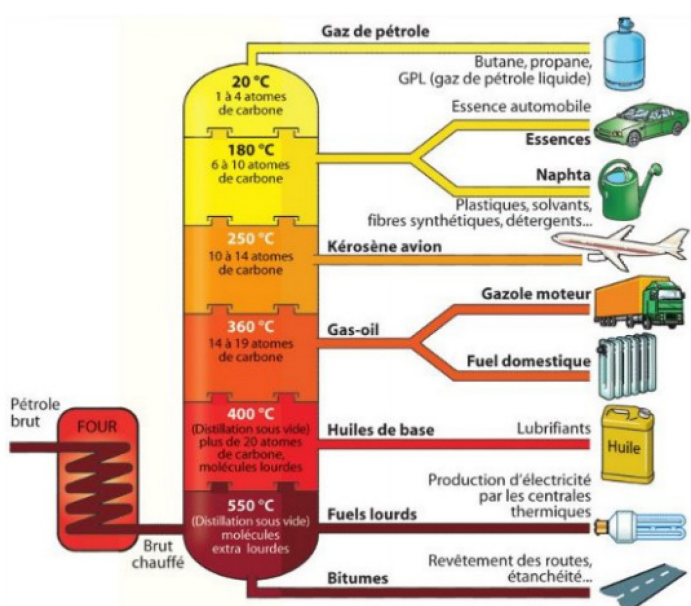


Figure 5.2 Schéma des produits de distillation du pétrole brut (tiré de : Bourdreux, 2011)

Le naphta, entre l'essence et le kérosène, obtenu à 160 °C, est le produit utilisé pour la production de matières plastiques (Mark, 2009). Ensuite, lors du vapocraquage, le naphta est chauffé à 825 °C à l'aide de vapeur d'eau pour le subdiviser à nouveau en sous-produits, dont l'éthylène, le monomère utilisé dans la fabrication de PE et de PVC, entre autres (Mark, 2009). De nombreux autres produits sont obtenus : butadiène, essences aromatiques et propylène (Mark, 2009).

Finalement, l'éthylène est polymérisé généralement à 100 °C et à une pression de 50 bars lors d'une polymérisation radicalaire, avec la présence d'un catalyseur de type organométallique (Mark, 2009).

Le PEHD est mis en forme soit par injection, thermoformage, extrusion ou rotomoulage (Mohsenzadeh, Zamani et Taherzadeh, 2017). La mise en forme de ce thermoplastique est habituellement entre 180 °C et 195 °C (Mohsenzadeh et al., 2017).

Il est possible de produire du PE à partir de ce glucose, mais plusieurs étapes de transformation doivent être opérées. D'abord, le glucose est transformé en éthanol par fermentation (Mohsenzadeh et al., 2017). L'éthanol obtenu subit une déshydratation catalytique à environ 400 °C (Mohsenzadeh et al., 2017). Par la suite, il ne reste qu'à faire la polymérisation radicalaire de l'éthylène en polyéthylène de la même façon qu'avec l'éthylène pétrochimique (Mohsenzadeh et al., 2017).

Le processus nécessite une étape de moins lorsque de l'éthanol est utilisé pour la production de PEHD biosourcé (Mohsenzadeh et al., 2017). En effet, en utilisant directement de l'éthanol, la production évite deux étapes supplémentaires, soit l'hydrolyse d'un polysaccharide et la fermentation des glucides obtenus. La canne à sucre est la ressource la plus utilisée à cette fin puisqu'elle présente moins d'impacts pour l'environnement qu'une grande culture comme le maïs, et est plus productive qu'une culture comme la betterave (Mohsenzadeh et al., 2017).

5.3 Dégradation et impacts sur l'environnement

Le PEHD est identifié par le numéro 2 de la collecte sélective des plastiques, séparé du PEBD qui porte le numéro 4 (Boustead, 2005b). Le recyclage du PEHD peut être cyclique, signifiant que la matière récupérée servira à la production de nouveaux produits en PEHD qui pourront par la suite être recyclés (Boustead, 2005b).

Le recyclage du PEHD permet d'éviter de nombreuses tonnes d'émission de GES. Il est estimé qu'une tonne de PEHD recyclée permet d'éviter la consommation de 0,51 t de pétrole brut pour s'approprier le naphta, de 0,31 t de gaz naturel et de près de 3 MJ/t pour fournir l'énergie nécessaire au centre de production (Boustead, 2005b). Les sources d'émission de GES reliées à la production de PEHD sont d'abord les combustibles fossiles ainsi que le processus de synthèse respectivement responsables de 79 % et 21 % des émissions (Boustead, 2005b).

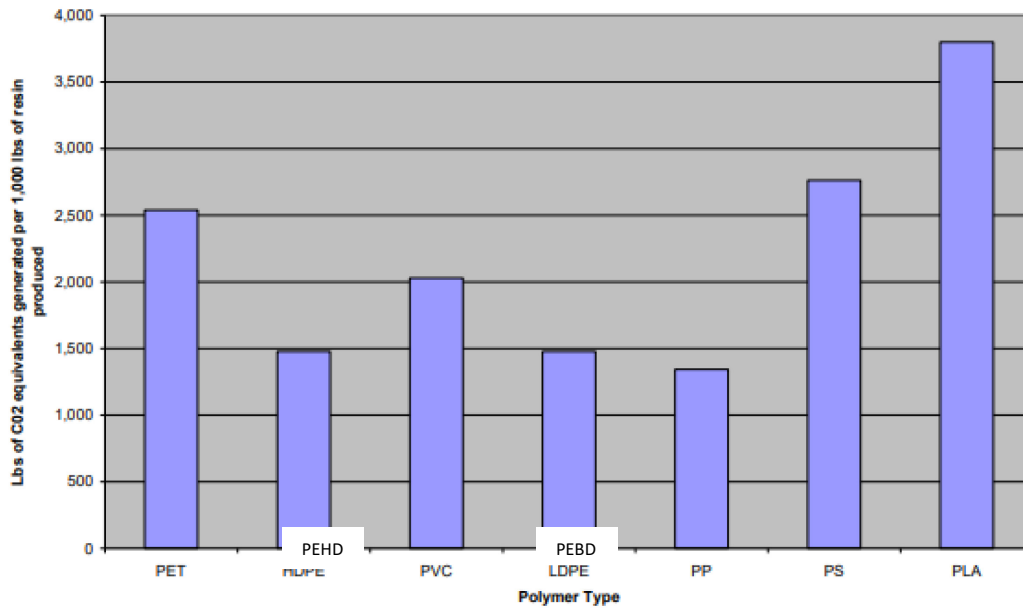


Figure 5.3 Émissions de GES associées à la production de différents polymères (tiré de : Castle, 2012)

La figure 5.3 illustre les émissions de GES en éq. CO₂ par différents types de polymère, dont le PEHD en deuxième position à partir de la gauche. La production de PEHD émet la même quantité d'émissions que le PEBD et davantage que le PP. Pour la production d'une tonne de polymère, le PEHD émet 1 478 t éq. CO₂, pouvant être réduit à 0,658 t éq. CO₂ lorsqu'il s'agit de PEHD recyclé. Cependant, la possibilité de produire du PEHD entièrement à partir de cellulose pourrait permettre la réduction de l'empreinte carbone du PEHD.

Une étude effectuée en Europe a analysé la demande énergétique pour la production de 3,87 millions de tonnes de PEHD chez différents producteurs (Boustead, 2005b). Il a été établi que le besoin énergétique moyen pour la production d'un kilogramme de PEHD est de 76 MJ (Boustead, 2005b). Le minimum observé était de 56 MJ/t et le maximum de 91 MJ/t (Boustead, 2005b).

5.4 Coût et situation économique

Le marché du PEHD est actuellement en transition au niveau des pays producteurs, consommateurs et du prix de vente (Plastics Insight, 2018b). Le prix du PEHD est actuellement à 1,50 \$ US/kg de matériau, donc en dessous du prix de l'ABS, mais supérieur à celui du PP

(Plastics Insight, 2018b). Le coût de production du PEHD est en grande partie relié au prix des combustibles fossiles, le pétrole brut et le gaz naturel, qui sont en augmentation depuis 2017 (Plastics Insight, 2018b).

Selon Recyc-Québec, le prix pour une tonne de PEHD issue de la collecte sélective est équivalent à 322,90 \$ US/t de matière en 2017, ce qui correspond à une diminution de 115,53 \$ US par rapport à 2016 (Recyc-Québec, 2017).

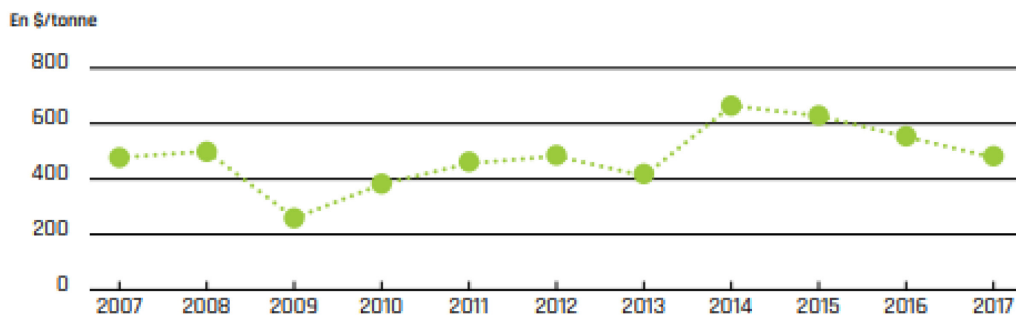


Figure 5.4 Évolution du prix des ballots de PEHD aux couleurs mélangées récupéré de 2007 à 2017 (tiré de : Recyc-Québec, 2018)

Il s'agit de ballots contenant uniquement du PEHD, mais qui comportent des produits aux couleurs mixtes (Recyc-Québec, 2017).

En 2016, l'offre de PEHD au niveau mondial a augmenté de 3 % par rapport à l'année précédente, s'élevant à 103 millions de tonnes (Plastics Insight, 2018b). La portion qu'occupe le PEHD dans cette production est de 47,5 millions de tonnes, ou 46 % de tout le PE produit (Plastics Insight, 2018b). La demande est en constante augmentation avec des estimations d'une croissance de 4,5 % par année d'ici 2014, selon une étude effectuée par des firmes spécialisées en analyse de marché (Plastics Insight, 2018b).

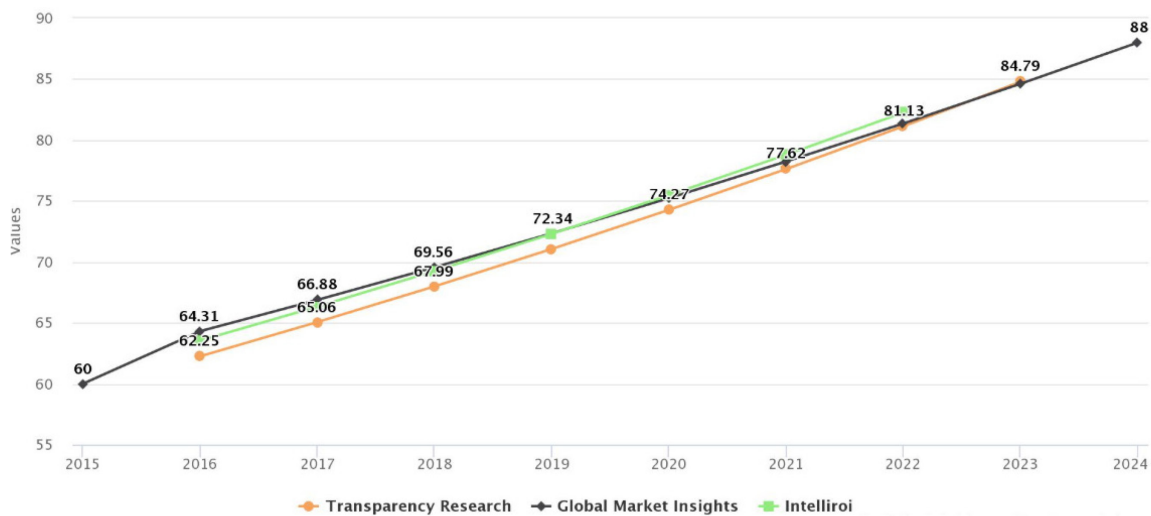


Figure 5.5 Prédications de l'évolution du marché mondial du PEHD en milliards \$ US (tiré de : Boustead, 2005b)

Selon les estimations affichées à la figure 5.5, la valeur du marché du PEHD pourrait augmenter de près de 50 % en 2024 par rapport à 2015 et atteindre une valeur de 88 milliards \$ US au niveau mondial. Le PEHD est en forte demande à cause de son faible prix, et de sa grande résistance autant pour des utilisations commerciales que résidentielles. En effet, au niveau commercial, l'utilisation du PEHD est en forte croissance pour la conception de certaines pièces de panneaux solaires, dont les câbles d'alimentation et des modules d'installation (Plastics Insight, 2018b).

5.5 Composite de PEHD et chanvre

Il existe des études qui s'intéressent aux composites de PEHD et de fibres de cellulose en tant que charges. Ces études évaluent la variation des propriétés du PEHD recyclé auquel sont ajoutés de 10 à 30 % de fibres de chanvre (Singh et al., 2014). Ces études effectuent également les mêmes tests avec un taux de 100 % de PEHD frais afin de déterminer s'il est possible d'obtenir les mêmes caractéristiques (Singh et al., 2014). Le PEHD frais consiste en des pastilles de PEHD qui n'ont pas été transformées depuis leur synthèse (Singh et al., 2014).

Il est possible d'y intégrer des fibres de chanvre, car la température de mise en forme du PEHD est autour de 190 °C, ce qui permet de préserver les qualités mécaniques des fibres qui se détériorent à une température supérieure à 200 °C.

Dans le but d'augmenter l'adhésion des fibres à la matrice de PEHD, les fibres de chanvre sont soumises à un traitement chimique dans une solution concentrée à 5 % de NaOH (Lu et al., 2012). Ce traitement a pour objectif de diminuer la quantité de groupes hydroxyles sur la molécule de cellulose, de retirer les molécules de pectine, de cire et de lignine (Lu et al., 2012). Le composite est mis en forme par moulage par injection et les paramètres sont testés sur cinq échantillons (Lu et al., 2012).

Tableau 5.2 Résultats des tests effectués sur les échantillons de PEHD avec fibres de chanvre en renfort (inspiré de : Lu et al., 2012)

Échantillon	Composition	Résistance à la traction (TS)	Résistance à la flexion (FS)	Module de Young (TM)
1	PEHD 100 % frais	32 MPa	32 MPa	0,8 GPa
S2	PEHD 50 % frais + 50 % recyclé	19,1 MPa	17,8 MPa	0,63 GPa
S3	Composite 20 % chanvre + 80 % PEHD (S2)	18,6 MPa	32,5 MPa	1,6 GPa
S4	Composite 30 % chanvre + 70 % PEHD (S2)	45,7 MPa	37,1 MPa	2,02 GPa
S5	Composite 40 % chanvre + 60 % PEHD (S2)	60,2 MPa	44,6 MPa	2,4 GPa

Les échantillons de composites avec chanvre sont composés du mélange de PEHD recyclé et de PEHD frais dont un échantillon sans fibre, identifié par S2, a été testé (Lu et al., 2012). Les résultats des essais effectués sur ces échantillons démontrent une forte augmentation de la TS et de la FS des composites, à l'exception de l'échantillon S3. L'échantillon possédant 30 % de son poids total en fibres de chanvre démontre une augmentation de 43 % de TS et 16 % de FS contre 88 % et 39 % pour l'échantillon S4 (Lu et al., 2012). Cependant, le module d'élasticité semble augmenter en lien avec la quantité de fibres dans le composite, l'échantillon S4 possédant une valeur près de quatre fois la valeur initiale de l'échantillon S2, donc une rigidité plus élevée. La densité a également été comparée, affichant une augmentation à 1,09 g/cm³ pour le composite avec 30 % de fibres de chanvre contre 0,96 g/cm³ pour l'échantillon de PEHD uniquement (Lu et al., 2012).

5.6 Résumé du PEHD

Le tableau 5.3 expose les points pertinents établis dans le chapitre 5. Le PEHD est un composé de la famille des PE qui possède la plus grande part du marché des thermoplastiques. Le PEHD possède la plus forte élasticité des polymères présentés, malgré de bonnes propriétés de résistances semblables à celles du PP. Tout comme le PP, le prix du PEHD est relativement faible et il est mis en forme à une température inférieure au niveau de dégradation des fibres de cellulose.

Tableau 5.3 Résumé des éléments principaux du PEHD

Polymère	TS (MPA)	FS (MPA)	TM (GPA)	Émissions (t éq. Co ²)	Besoin énergétique	Prix (\$ US/KG)
PEHD	32	32	0,8	1,50/t	76 MJ/kg	1,50

Légende : **TS** : Résistance à la traction ; **FS** : Résistance à la flexion ; **TM** : module d'élasticité

En plus du module d'élasticité de 0,8, il a été établi que le PEHD affiche un allongement de 150 %, soit le plus grand taux, et égal à celui du PP. Également, le PEHD affiche la valeur la moins élevée des thermoplastiques pétrosourcés présentés au niveau des émissions de GES liées à sa production.

6. POLYPROPYLÈNE (PP)

Le PP a été développé en 1954 et a ensuite été commercialisé durant les années suivantes (Maddah, 2016). Ce polymère est fortement utilisé depuis les années 1970 en raison du rapport entre ses bonnes propriétés et son faible prix (Maddah, 2016). De plus, le PP possède une bonne résistance à plusieurs groupes de produits chimiques, une forte résistance à la chaleur et est synthétisé facilement. Ce polymère peut être mis en forme par injection, extrusion, thermoformage ou rotomoulage pour concevoir des produits d'emballage, de consommation domestique, des pièces automobiles, des domaines de l'électronique, laboratoire et médical (Maddah, 2016).

6.1 Propriétés

Le PP est synthétisé à partir d'un seul type de monomère, le propylène, qui peut être jumelé à d'autres monomères, tel le PE ou le PC, pour former de nombreux copolymères (Maddah, 2016). Il s'agit d'un des thermoplastiques les plus légers et il est complètement translucide, au contraire du PE (Maddah, 2016).

Tableau 6.1 Les propriétés principales du PP (inspiré de : Material Properties Database, 2009e)

Type	TS MPa	FS MPa	Tm GPa	Charpie kJ/m ²	Allongement à la rupture	Densité g/cm ³	TTV (°C)	Dureté	Humidité (%)
PP	33	40	1,5	10	150 %	0,91	-20	RR90	0,05

Légende : **TS** : Résistance à la traction ; **FS** : Résistance à la flexion ; **TM** : module d'élasticité ;
TTV : température de transition vitreuse

Le tableau 6.1 présente les propriétés principales du PP selon les normes ISO et ASTM des essais sur les polymères (Maddah, 2016). Le PP a une densité de 0,91 g/cm³ et une dureté de 90 sur l'échelle de Rockwell, soit dans la moyenne des polymères présentés. Il se situe également dans la moyenne quant aux propriétés mécaniques, possédant une résistance à la tension et à la flexion de 33 et 40 respectivement et d'une résistance au test Charpy de 10 kJ/m². Le PP a cependant un module d'élasticité de 1,5 et un allongement à la rupture de 150 %, ce qui démontre une forte élasticité (Maddah, 2016). Le PP a une température de transition vitreuse

de -20 °C étant un rare polymère, outre les polyvinyles et le PEHD, possédant ce paramètre dans la valeur négative. Finalement, ce polymère a un taux d'absorption maximale d'humidité de 0,05 %.

6.2 Structure et synthèse

Le PP est un polymère thermoplastique de la famille des vinyliques et peut être polymérisé en trois configurations différentes (Schimanski et Tilo, 2002). La structure du PP peut varier entre la configuration atactique, isotactique et syndiotactique, selon le type d'utilisation auquel le polymère est destiné (Schimanski, 2002).

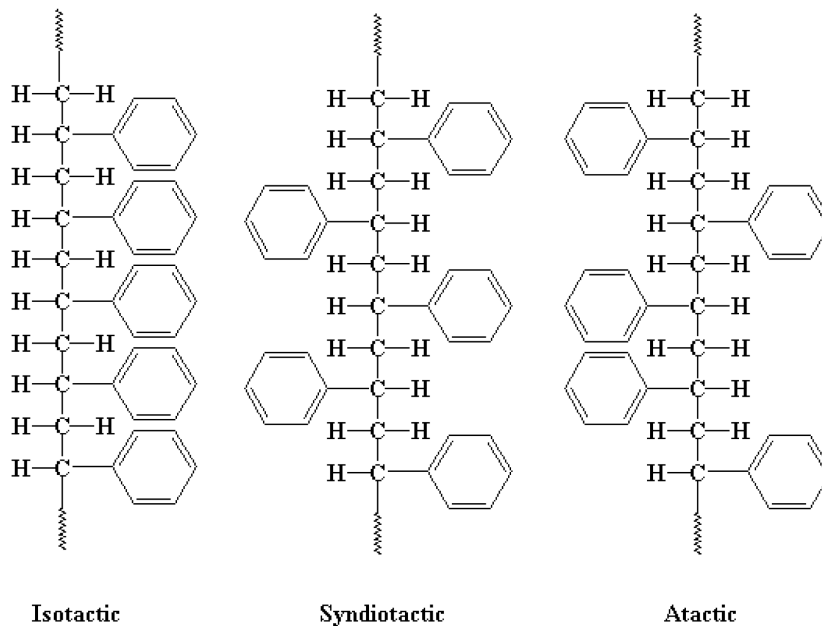


Figure 6.1 Exemple des différentes configurations de structures moléculaires d'un polymère
(tiré de : University of Southern Mississippi, 2005)

Le PP atactique a une structure moléculaire entièrement aléatoire et possède des propriétés semblables à un élastomère, contrairement aux PP isotactique et syndiotactique qui expriment des caractéristiques de thermoplastiques (Schimanski, 2002). Le PP isotactique a une structure moléculaire entièrement symétrique, tant au niveau de la chaîne que des groupes méthyles, contrairement au PP syndiotactique dont les groupes méthyles, qui se fixent entre eux pour former le polymère, s'alternent de façon continue (Schimanski, 2002). Le PP isotactique est la

forme conventionnelle que l'on retrouve dans la plupart des produits de PP et celle qui est étudiée dans cet essai (Schimanski, 2002).

La production de PP débute par l'obtention de naphta à partir de pétrole qui contient plusieurs monomères sous forme de gaz, dont le propylène (Schimanski, 2002).

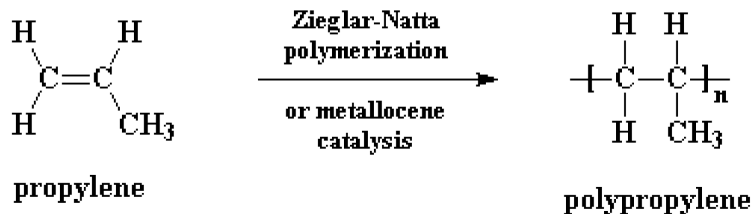


Figure 6.2 Structure du propylène et du PP (tiré de : Alameen Fadlelmoula, 2008)

La synthèse débute par la polymérisation en chaîne du propylène à l'aide d'un catalyseur métallocène (Schimanski, 2002). Le propylène se trouve sous forme gazeuse ou liquide, selon le processus exercé (Schimanski, 2002). Une fois le propylène extrait du naphta, il peut être utilisé pour la synthèse de PP en étant immédiatement intégré au catalyseur en phase de prépolymérisation (Schimanski, 2002). Par la suite, la polymérisation se fait dans un réacteur en boucle qui récupère les monomères qui s'échappent et les réintègre dans le système en plus de séparer et briser les copolymères indésirables lorsque des molécules d'éthylène sont présentes, par exemple (Schimanski, 2002). Le produit de la synthèse est récupéré dans un réacteur spécialisé qui aide à précipiter les molécules de PP qui sont sous forme gazeuse, à les sécher et, dans la plupart des cas, à les mettre en pastilles (Schimanski, 2002).

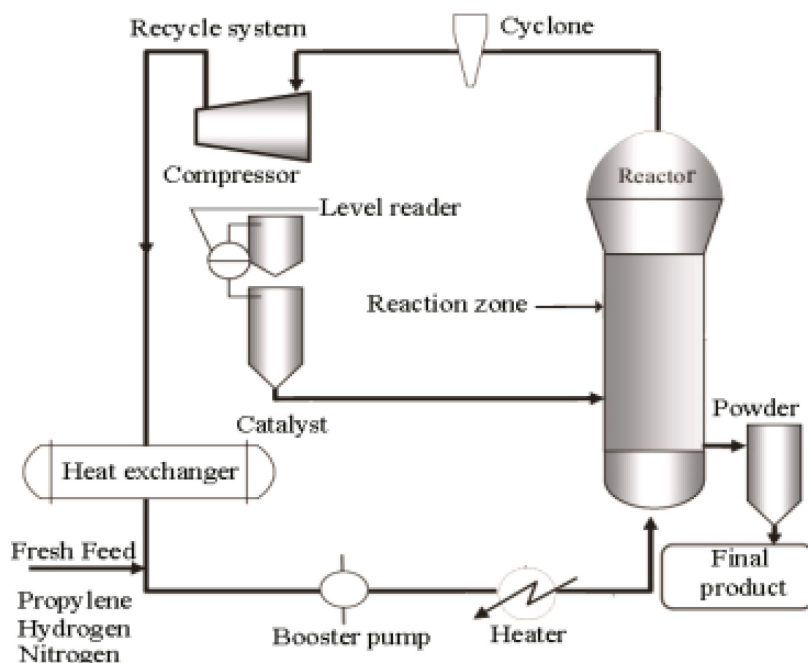


Figure 6.3 Schéma du processus de synthèse du PP (tiré de : Khan et al., 2014)

Tel qu'illustré à la figure 6.3, la production au niveau industriel de PP débute par l'intégration de propylène, d'hydrogène et d'azote dans le système, tous sous forme gazeuse (Schimanski, 2002). Dès l'entrée des gaz, ceux-ci sont mis sous haute pression et chauffés avant de réagir immédiatement avec le catalyseur (Schimanski, 2002). Ce dernier permet de faciliter la réaction et d'atteindre un taux de polymérisation de 98 % dans les installations industrielles les plus performantes (Schimanski, 2002). Les monomères qui n'ont pas été colligés sont récupérés et acheminés au système de recyclage qui comprime les gaz, les refroidit afin de ne pas affecter le nouveau propylène et les réintègre dans le système de production (Schimanski, 2002).

Le PP peut être mis en forme par l'ensemble des méthodes de mise en forme présentées (Schimanski, 2002). La température de mise en forme du thermoplastique varie en fonction de la pression appliquée par le type de mise en forme, mais se situe généralement autour de 150 °C (Schimanski, 2002).

6.3 Dégradation et impacts sur l'environnement

Le PP est identifié par le numéro 5 sur la charte des différents produits plastiques (Schimanski, 2002). Ce thermoplastique aurait le plus faible taux de recyclage de ces types de plastiques au

niveau mondial selon l’American Chemistry Council et le World Economic Forum (2016). Cette mauvaise performance est entre autres due au fait que de nombreux produits en PP sont des produits à utilisation unique (Schimanski, 2002).

La Figure 4.2 du chapitre 4 illustre le taux d’émissions de GES lié à la production de PP, qui s’élève à 1,95 t eq. CO_2 /t de polymère (Boustead, 2005c). Il s’agit d’un taux plus élevé que le PEHD, mais plus faible que les autres thermoplastiques en général (Boustead, 2005c).

Le besoin énergétique pour la production de PP est similaire à celui de PEHD, atteignant 73,37 MJ/kg de polymère (Boustead, 2005c). Il s’agit du besoin énergétique le plus faible parmi les polymères pétrosourcés présentés, mais supérieur à celui du PLA.

Le biopolypropylène est une forme de PP produit de façon similaire au bio-PEHD présenté au chapitre 5. Le biopropylène provient ultimement de sucres végétaux, qui, à la suite de leur fermentation, produisent de l’éthanol. L’éthanol est par la suite déshydraté en éthylène avant d’être transformé en butène et ultimement en biopolypropylène biosourcé (Boustead, 2005c).

6.4 Coût et situation économique

Le PP est le second polymère le plus produit à l’échelle internationale derrière le PE, à un prix d’environ 1,10 \$ US/kg, mais celui-ci fluctue au rythme de l’état du marché et de la volatilité du prix du pétrole (Plastics Insight, 2018d). La demande et la production de PP sont en forte croissance dans certains pays d’Asie, provoquant une fluctuation du prix (Plastics Insight, 2018d).

L’offre de PP est en croissance régulière depuis 10 ans atteignant une production totale mondiale de 73,7 millions de tonnes en 2016 (Plastics Insight, 2018d).

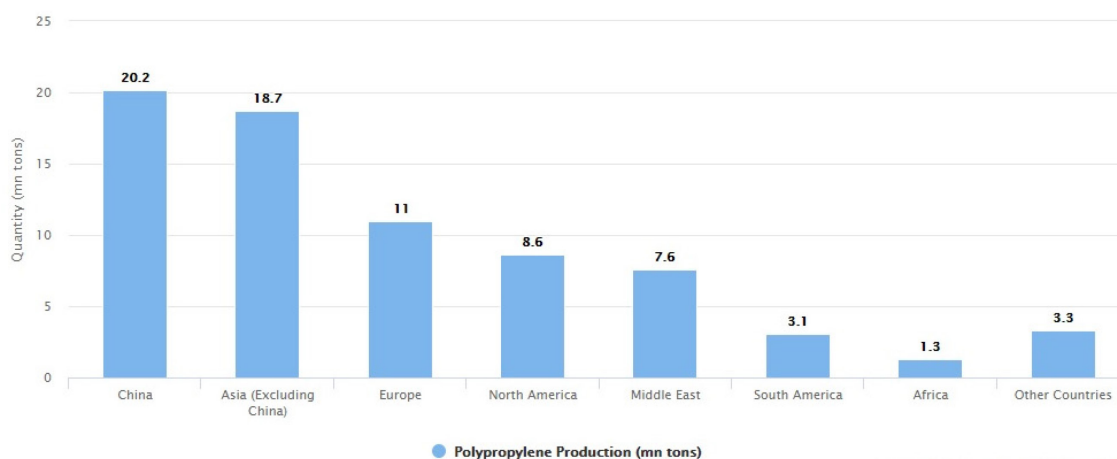


Figure 6.4 Production mondiale de PP par région en millions de tonnes (tiré de : Plastics Insight, 2018d)

La figure 6.4 illustre le poids de l'Asie dans le marché international, responsable de 52 % de la production mondiale de PP (Plastics Insight, 2018d). Le Moyen-Orient connaît également une forte croissance dans l'offre de PP, bien que cette région n'affiche pas une croissance aussi importante dans la demande (Plastics Insight, 2018d).

La demande pour la résine de PP augmente de façon constante affichant une croissance de 4,6 % entre 2000 et 2015 (Plastics Insight, 2018d). Des études de marché prédisent une croissance continue de la demande de PP d'environ 4,4 % entre 2015 et 2020 (Plastics Insight, 2018d).

La figure 6.5 illustre l'estimation de la croissance annuelle de la demande de PP entre 2015 et 2020.

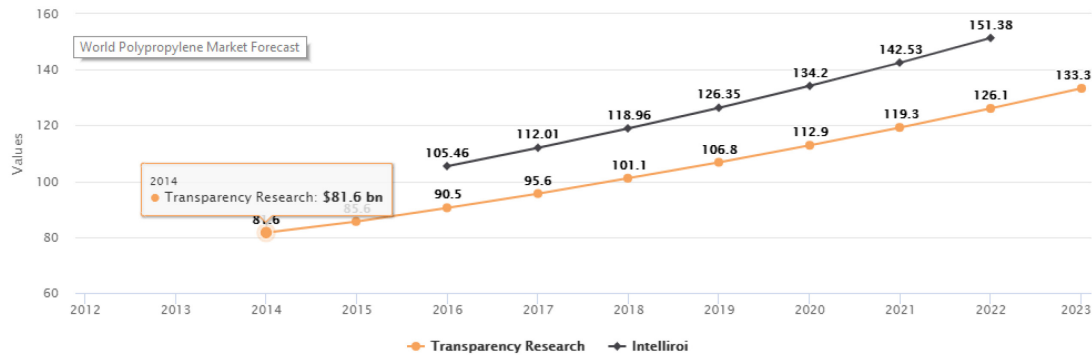


Figure 6.5 Estimation du marché de PP entre 2016 et 2023 en milliards \$ US (tiré de : Plastics Insight, 2018d)

La figure 6.5 indique les estimations de firmes spécialisées en études de marché qui prévoient une augmentation d'environ 40 % en 6 ans, soit entre 2016 et 2022, et l'atteinte d'une valeur de 151,38 milliards \$ US (Plastics Insight, 2018d).

Le marché du biopolypropylène devrait quant à lui atteindre 36,19 millions \$ US en 2020 selon les mêmes estimations (Plastics Insight, 2018d). Les types de marché pour les biomatériaux ou biocomposites de PP sont principalement les industries de l'automobile, de produits d'emballage, de la construction et commerciales (Plastics Insight, 2018d).

6.5 Composite de PP et chanvre

De nombreuses études s'intéressent aux matériaux composites de chanvre et de PP pour diminuer l'impact environnemental et le coût de production du polymère (Suardana et al., 2011). Le but primaire de ces études est de déterminer si la fibre de chanvre est en mesure de substituer la fibre de verre dans les thermoplastiques renforcés de PP (Suardana et al., 2011). Pour y parvenir, les fibres intégrées dans la matrice de PP doivent subir un traitement chimique afin d'augmenter l'adhésion avec la matrice et ainsi favoriser la performance des fibres (Suardana et al., 2011). Le PP est une matrice intéressante pour l'intégration de fibres de cellulose en raison de sa température de mise en forme qui n'atteint pas la limite de dégradation de la cellulose (Suardana et al., 2011). Cependant, le PP est hydrophobe et non polaire, contrairement aux fibres de chanvre, dont les groupes hydroxyles cherchent à former ce type de liaisons (Suardana et al., 2011).

Les fibres sont traitées dans une solution de NaOH et de silane, un agent couplant parfois utilisé sur de la fibre de verre dans le même objectif (Suardana et al., 2011). Le traitement consiste à submerger les fibres dans la solution de NaOH à une concentration de 2 %, 4 % et 6 % (Suardana et al., 2011). Un second traitement est ensuite effectué en plaçant les fibres dans une solution de silane à une concentration maximale de 6 % suivant le même protocole qu'avec le NaOH (Suardana et al., 2011). Les essais effectués sur les échantillons composites ont été faits selon les normes ASTM et ISO concernées (Suardana et al., 2011).

Tableau 6.2 Propriétés mécaniques du PP et de ses composites de chanvre selon les différentes proportions de fibres (tiré de : Shahzad, 2012)

Fiber/fraction (%)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)	Impact strength (J/m ²)
None	20–40	1.0–1.4	42.1	1.1	16
Hemp/30 (wt)	22.1	10.2			
Hemp/40 (wt)	40.2	3.55	73.3	4.1	29
Hemp/50 (wt)	50	6.5	85	4	53 (kJ/m ²)
Hemp/30 (wt)	32.3	1.53	48.5	1.67	15.1 (kJ/m ²)
Hemp/30–70 (wt)	55	6.7	85	4.7	46 (kJ/m ²)
Hemp/64 (wt)	42		63		152
Hemp	34	2.7	41.5	2.3	3.89 (kJ/m ²)
Glass/22 (vol)	88.6	6.2	60	4.4	54.12 (kJ/m ²)

Le tableau 6.2 démontre que les composites de PP et de fibres de chanvre possèdent des propriétés mécaniques supérieures au polymère vierge en ce qui concerne les trois paramètres de résistance, soit à la traction, à la flexion et au test Charpy (Shahzad, 2012). Cependant, le module d'élasticité semble augmenter de façon irrégulière lorsque des fibres sont intégrées dans la matrice de PP, ce qui signifie une plus grande rigidité du thermoplastique. Cette variation est causée par l'arrangement aléatoire des fibres de chanvre dans les composites, qui est justifié par la faible température de mise en forme, empêchant la matrice de polymère d'atteindre un niveau de viscosité suffisant pour intégrer les fibres de façon optimale (Shahzad, 2012).

L'absorption maximale d'humidité des échantillons de composite possédant différentes proportions de fibres de chanvre a été évaluée (Hargitai et al., 2008). Les échantillons ont été

immergés dans l'eau durant 22 jours, subissant des inspections régulières pour calculer la progression (Hargitai et al., 2008). Après 19 jours, le composite à 30 % de fibres de chanvre avait atteint son maximum d'absorption d'humidité atteignant 6 %, contrairement à 0,05 % pour la matrice de PP.

6.6 Résumé du PP

Le tableau 6.3 affiche les éléments importants qui ont été présentés dans le chapitre 6. Le PP est un polymère aux propriétés performantes en fonction de son faible prix. Il est mis en forme à la température la plus faible en rapport aux thermoplastiques pétrosourcés comparés dans cette étude, ce qui est avantageux pour l'intégration de fibres de chanvre.

Tableau 6.3 Résumé des éléments principaux du PP

Polymère	TS (MPa)	FS (MPa)	TM (GPa)	Émissions (t éq. Co ²)	Besoin énergétique	Prix (\$ US/kg)
PP	33	40	1,5	1,95/t	73 MJ/kg	1,10

Légende : **TS** : Résistance à la traction ; **FS** : Résistance à la flexion ; **TM** : module d'élasticité ;

Le PP ne possède pas de propriétés fortement supérieures aux autres thermoplastiques, mais presque l'ensemble de ses caractéristiques sont les valeurs médianes en comparaison aux PEHD, ABS, AC et PLA. Le PP possède le plus faible prix des polymères présentés à 1,10 \$ US/kg.

7. ACRYLONITRILE BUTADIÈNE STYRÈNE (ABS)

L'ABS est un thermoplastique produit à partir de trois monomères différents, soit l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène (Yu et al., 2009). Ces monomères sont assemblés en paires, entre eux, pour former des copolymères (Yu et al., 2009). La structure de l'ABS est constituée à partir de deux groupes de copolymères, soit le styrène-acrylonitrile et le styrène-butadiène, formant un équilibre entre les propriétés mécaniques performantes et une luisance extérieure importante (Yu et al., 2009). Ce thermoplastique a été développé vers 1950, environ 10 ans après la découverte des copolymères qui forment la structure du polymère (Yu et al., 2009). Ce dernier est utilisé, entre autres, pour la production des pièces de LEGO, de certaines pièces automobiles ainsi que par l'industrie électrique et de l'électronique (Yu et al., 2009). Les concentrations des différents monomères varient énormément en fonction de l'utilisation recherchée, en plus de la synthèse de nombreux copolymères avec, entre autres, le PC, le PVC et le PP (Mark, 2009).

7.1 Propriétés

L'ABS est composé de trois monomères distincts à différentes concentrations, l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène (Yu et al., 2009). Chaque monomère contribue à l'expression de certaines caractéristiques du polymère, que ce soit la résistance aux chocs, à la température ou encore une apparence brillante et nette (Yu et al., 2009). Ce thermoplastique possède des caractéristiques lui permettant d'être utilisé dans le milieu de l'ingénierie industrielle et pour la fabrication de produits de consommation domestique (Yu et al., 2009). À noter que l'échantillon d'ABS utilisé pour ces tests est composé de 30 % d'acrylonitrile, de 20 % de butadiène et de 60 % de styrène (Yu et al., 2009).

Tableau 7.1 Les propriétés principales de l'ABS (inspiré de : Material Properties Database, 2009a)

Type	TS (MPa)	FS (MPa)	Tm (GPa)	Charpie kJ/m ²	Allongement à la rupture	Densité (g/cm ³)	TTV (°C)	Dureté	Humidité (%)
ABS	45	75	2,5	20	35 %	1,05	110	SA97 ou R102	0,1

Légende : **TS** : Résistance à la traction ; **FS** : Résistance à la flexion ; **TM** : module d'élasticité ;
TTV : température de transition vitreuse

Le tableau 7.1 illustre les propriétés principales de l'ABS qui possède une densité de 1,05 et une dureté de 102 sur l'échelle de Rockwell. L'ABS démontre une forte résistance aux produits chimiques, à la chaleur et à l'humidité, avec une absorption maximale de 0,1 % de son poids total. La résistance à la tension et la résistance à la flexion du polymère sont respectivement de 45 et 75 MPa, soit les valeurs les plus élevées chez les plastiques pétrosourcés présentés. Néanmoins, la valeur du module d'élasticité est de 2,5 GPa, signifiant que l'ABS est au contraire le plastique pétrochimique présenté ayant la plus faible élasticité. Finalement, la température de transition vitreuse chez l'ABS se situe autour de 110 °C, la résistance au test Charpy est de 20 kJ/m² et l'allongement à la rupture est de 30 %, confirmant la forte résistance et la faible élasticité du polymère.

7.2 Structure et synthèse

Contrairement aux polymères présentés précédemment, l'ABS nécessite deux étapes de polymérisation pour produire la structure finale du polymère (Yu et al., 2009). La concentration de chaque monomère varie en fonction du produit recherché, mais généralement l'ABS contient entre 15 et 35 % d'acrylonitrile, entre 40 et 60 % de styrène, ainsi qu'entre 5 et 30 % de butadiène (Yu et al., 2009). La production de ce polymère nécessite donc la synthèse de deux copolymères, qui subissent par la suite une polymérisation en présence d'acrylonitrile (Yu et al., 2009).

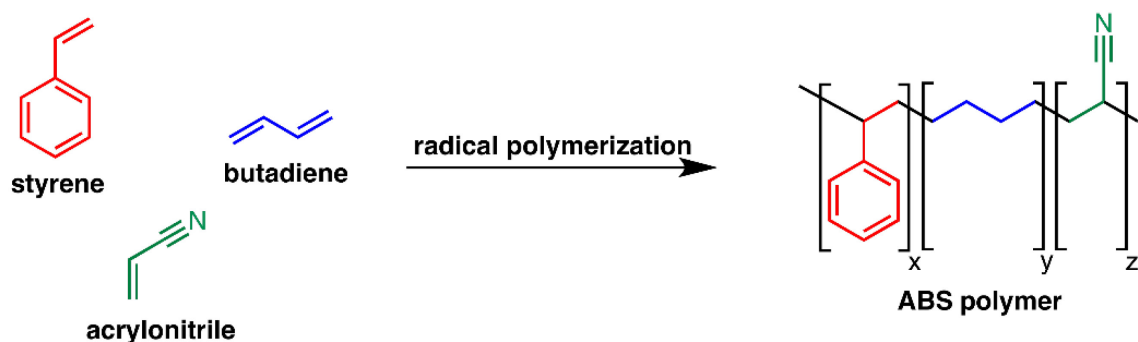


Figure 7.1 Illustration de la structure et de l'arrangement moléculaire des monomères de l'ABS (tiré de : PolyCraft World, 2015)

La figure 7.1 illustre de façon élémentaire la structure moléculaire et la disposition que ces dernières adoptent pour ultimement former le polymère. Il est également indiqué que la

polymérisation nécessaire pour assembler ces monomères en ABS est de type radicalaire, soit une polymérisation en chaîne. Cependant, le processus de synthèse ne forme pas le polymère directement à partir de ces molécules, des étapes doivent être réalisées en amont.

Le processus débute par l'extraction du naphta par le raffinage du pétrole, suite auquel les différents gaz sont séparés (Yu et al., 2009). Parmi ces gaz se trouvent le benzène, l'éthylène, le propylène, certains isomères de butène et le butadiène (Yu et al., 2009). Dans la plupart des cas, le styrène et l'acrylonitrile sont obtenus à partir de la déshydrogénation de l'éthylbenzène, un sous-produit du raffinage (Yu et al., 2009).

La réaction de polymérisation des copolymères se produit à 180 °C où le styrène acrylonitrile est sous forme solide et le polybutadiène sous forme de caoutchouc (Yu et al., 2009). Les molécules qui forment la structure de l'ABS se positionnent de façon perpendiculaire ; elles possèdent des liaisons polaires, ce qui contribue à la bonne résistance globale du polymère (Yu et al., 2009). Le styrène est responsable de l'apparence brillante du plastique, la concentration de celui-ci varie donc en fonction de l'utilisation qui sera faite du produit (Yu et al., 2009).

L'ABS est mis en forme par injection, thermoformage, calandrage ou extrusion à une température qui peut atteindre entre 230 °C et 250 °C (Yu et al., 2009).

7.3 Dégradation et impacts sur l'environnement

Le système de récupération des matières recyclables identifie les produits de ce type avec l'identification 9 ou ABS (Boustead, 2005a). Le plastique formé à la suite du recyclage de ce dernier ne peut en revanche pas être utilisé pour certaines applications où l'esthétique est essentielle à cause de l'hétérogénéité des pièces mélangées (Boustead, 2005a).

La production d'ABS entraîne des émissions de GES reliées aux combustibles fossiles, pétroles et gaz, ainsi qu'au processus de synthèse du polymère (Boustead, 2005a). L'empreinte carbone de l'ABS est parmi les plus élevées des thermoplastiques présentés dans cette étude avec 3,46 t éq. CO₂/t produite (Boustead, 2005a). La plus forte empreinte est en partie due au fait que l'ABS est constitué de deux copolymères, ce qui nécessite un processus avec une plus grande consommation de gaz naturel (Boustead, 2005a).

Au niveau énergétique, la production d'ABS nécessite 95,34 MJ pour la production d'un kilogramme de polymère (Boustead, 2005a). L'ABS est parmi les polymères présentés dans cet essai qui nécessite la plus importante quantité d'énergie (Boustead, 2005a).

7.4 Coût et situation économique

L'ABS est un thermoplastique plus dispendieux que le PEHD et le PP, affichant un prix d'environ 2,87 \$ US/kg en 2018 (Plastics Insight, 2018a).

La capacité mondiale de production de ce polymère a atteint un maximum de 10,8 millions de tonnes en 2016, soit environ le quart du volume de PEHD (Plastics Insight, 2018a). Tout comme le PEHD et le PP, l'ABS est particulièrement demandé dans certaines régions d'Asie qui, avec le développement de ses industries, a produit 80 % des 10,8 millions de tonnes d'ABS en 2016 (Plastics Insight, 2018a).

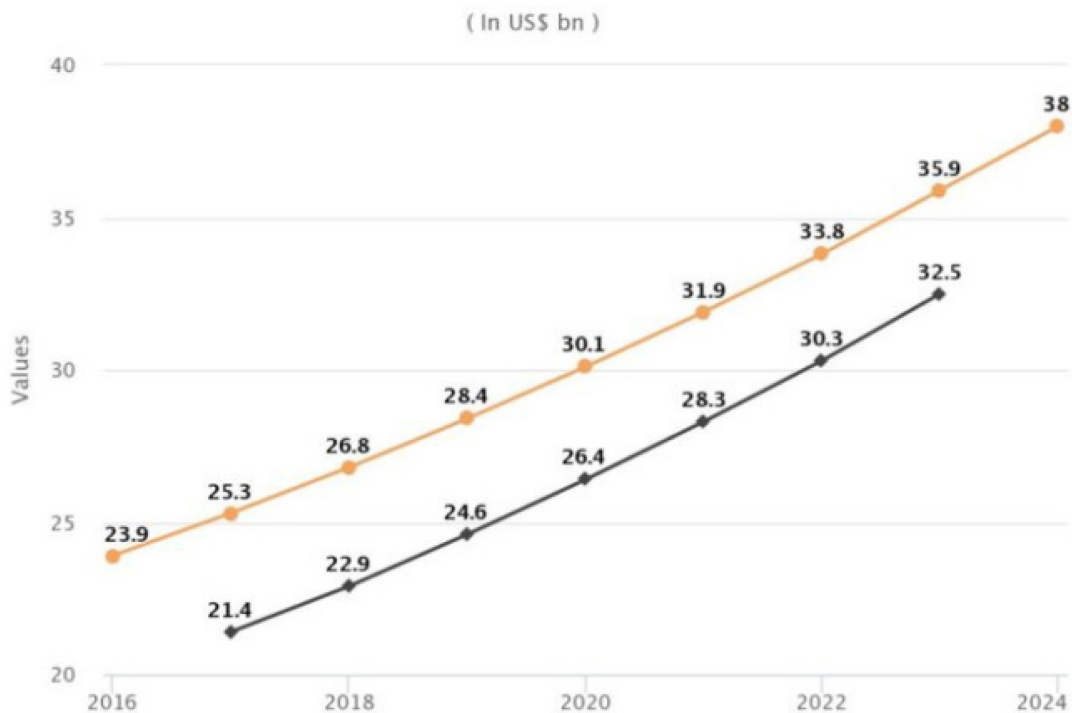


Figure 7.2 Estimation du marché de l'ABS entre 2016 et 2024 en milliards \$ US (tiré de : Plastics Insight, 2018 a)

La figure 7.2 illustre la valeur du marché de l'ABS en 2016, suivi des estimations de deux entreprises spécialisées en études de marché (Plastics Insight, 2018a). La valeur du marché mondial d'ABS devrait augmenter de plus de 5 % par année selon les estimations, la valeur de l'axe vertical étant en milliards \$ US (Plastics Insight, 2018a).

7.5 Composite d'ABS et chanvre

Certains chercheurs s'intéressent aux composites d'ABS et de fibres de chanvre, mais de façon moins importante que pour les autres polymères présentés. Pourtant, les fibres permettent de réduire le prix du polymère de 0,44 \$ US/kg, de préserver le caractère recyclable du plastique et utiliser en partie une ressource renouvelable (Durante et al., 2004). Les échantillons ont été mis en forme par injection à une température de 150 °C et leur résistance à la traction ainsi qu'à la flexion a été testée (Durante et al., 2004).

Pour faire la synthèse d'échantillons composites d'ABS et de chanvre, les chercheurs ont dû faire face aux mêmes contraintes et processus que les composites d'autres types de polymère. En effet, la température de mise en forme ne devait pas dépasser les 200 °C, contrairement aux 230 °C habituellement utilisés pour l'ABS (Durante et al., 2004). Les fibres ont subi un traitement alcalin dans une solution de NaOH, avant d'être rincées et séchées (Durante et al., 2004). Finalement, les tests effectués ont tous été complétés selon les normes ASTM et ISO concernées (Durante et al., 2004). Les composites ont été évalués sur différents paramètres, soit la résistance à la tension, la résistance à la flexion et le module d'élasticité (Durante et al., 2004).

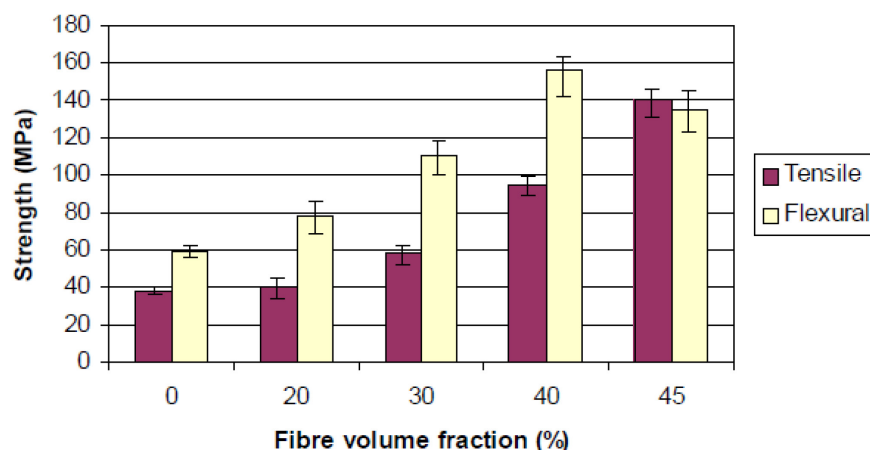


Figure 7.3 Résistance à la tension et à la flexion de composites ABS en fonction du volume de fibres de chanvre (tiré de : Durante et al., 2004)

La figure 7.3 présente les résultats concernant la résistance à la tension et la résistance à la flexion. Il est proposé que le traitement alcalin efficace, la température de mise en forme et la pression appliquée lors de l'injection ont permis aux fibres d'adhérer suffisamment à la matrice d'ABS pour exprimer leur forte résistance mécanique (Durante et al., 2004).

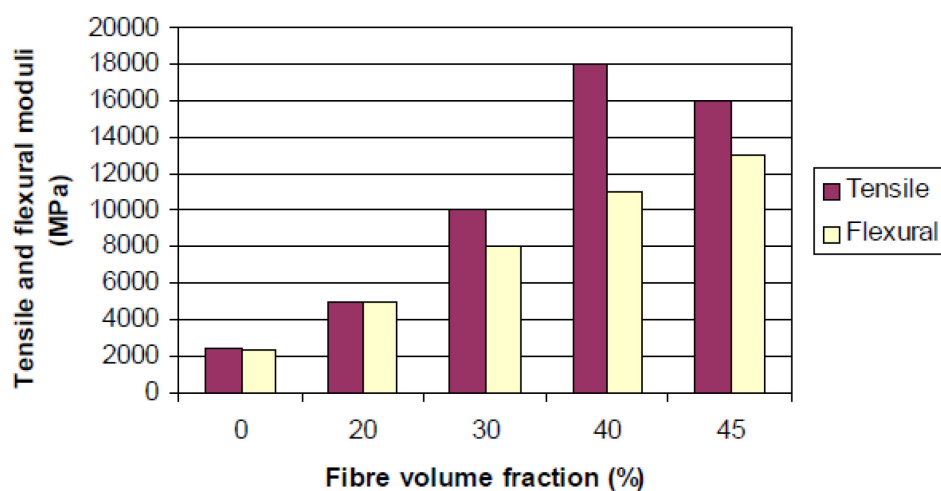


Figure 7.4 Module d'élasticité (rouge) des composites ABS en fonction du volume de fibres de chanvre (tiré de : Durante et al., 2004)

Contrairement à la résistance mécanique du composite, la capacité du matériau à plier est plutôt faible lorsqu'il y a présence de fibres de chanvre (Durante et al., 2004). Cette plus faible performance s'explique par la basse température de mise en forme selon les chercheurs, qui

supposent que cela découle d'un délaminage de la structure qui provoque des valeurs de déformation plus faibles (Durante et al., 2004).

En conclusion, malgré l'absence de traitement pour les fibres de chanvre et la température inférieure à celle de la matrice d'ABS, le composite semble afficher de meilleures propriétés de résistance et une plus grande rigidité.

7.6 Résumé de l'ABS

L'ABS est donc un polymère avec une structure plus complexe que les autres thermoplastiques présentés précédemment. Il est mis en forme à une température plus élevée et possède une densité plus élevée que le PP et le PEHD. Tel qu'exposé dans le tableau 7.2, il possède une forte résistance à la tension et à la flexion et une faible élasticité.

Tableau 7.2 Résumé des éléments principaux de l'ABS

Polymère	TS (MPa)	FS (MPa)	TM (GPa)	Émissions (t éq. CO ₂)	Besoin énergétique	Prix (\$ US/kg)
ABS	45	75	2,5	3,46/t	95 MJ/kg	2,87
Légende : TS : Résistance à la traction ; FS : Résistance à la flexion ; TM : module d'élasticité						

L'ABS possède des caractéristiques performantes, mais spécifiques à certaines utilisations. Néanmoins, ce polymère affiche la valeur la plus élevée des thermoplastiques pétrosourcés présentés au niveau des émissions de GES liées à sa production, du besoin énergétique et de son prix.

8. ANALYSE CRITIQUE

La synthèse des informations contenues dans les chapitres 3 à 7 est présentée dans le tableau A.1 à l'annexe 1 (p. 94) du document. L'analyse de ce tableau permettra d'identifier les éléments contraignants et ceux favorables à l'utilisation du chanvre dans la fabrication de composites plastiques. Les éléments pertinents qui s'illustrent dans le tableau A.1 sont ainsi analysés ci-dessous dans le but de formuler des recommandations. Les valeurs indiquées en vert illustrent une amélioration des paramètres présentés, étant en rouge dans le cas contraire. Il est également important de spécifier que les calculs d'estimation des sections 8.2 et 8.3 sont faits selon les informations disponibles et qu'un polymère est rarement 100 % vierge.

8.1 Analyse des propriétés

Les neuf propriétés physicochimiques évaluées de chaque polymère présenté ont été comparées au minimum d'une fois entre les composites en chanvre et les polymères vierges. De ces paramètres, trois ont été testés pour l'ensemble des composites, soit la résistance au cisaillement (TS), la résistance à la flexion (FS) et le module d'élasticité (TM). L'analyse de multiples données sur l'effet du chanvre sur divers types de polymère permet d'observer avec crédibilité certains éléments favorables ou défavorables de l'utilisation du chanvre en composite thermoplastique. De plus, les propriétés des composites présentées sont celles des échantillons contenant 30 % de chanvre en poids total. Le but est d'obtenir des résultats complémentaires aux analyses afin de comparer non seulement les composites avec les polymères vierges, mais également entre eux.

Tableau 8.1 Synthèse des propriétés principales des polymères et composites

	Résistance à la tension		Résistance à la flexion		Module d'élasticité	
Polymère	Résine ¹ (MPa)	Composite ² (MPa)	Résine ¹ (MPa)	Composite ² (MPa)	Résine ¹ (GPa)	Composite ² (GPa)
ABS	45	58	75	110	2,5	8
AC	30	36	55	77	1,7	2,55
PEHD	32	45,7	32	37,1	0,8	2,02
PLA	45	54,6	80	112,7	3,8	5,6
PP	33	60,2	40	73,3	1,5	6,4

¹Polymère vierge en granule ou en poudre sans agent de renfort

²Composite à 30 % de chanvre

Le tableau 8.1 rassemble les résultats des tests de l'ensemble des études scientifiques présentées dans les sections précédentes. Il est possible de remarquer que les paramètres de résistance à la tension et à la flexion augmentent considérablement chez l'ensemble des composites par rapport au polymère de base. Le PP est la matrice dont les trois paramètres ont le plus augmenté, de plus de 80 % pour la TS et la FS. Plusieurs facteurs peuvent justifier la meilleure performance du chanvre avec la matrice de PP. La température de mise en forme du PP est naturellement sous la température de dégradation des fibres, contrairement à l'ABS et au PEHD dont la température de mise en forme doit être modifiée. Le fait que la température de mise en forme habituelle du polymère soit inférieure à celle de dégradation de la cellulose permet à la matrice d'atteindre un degré de viscosité plus grand et améliore l'adhésion avec les fibres (Shahzad, 2012). Le traitement chimique des fibres est sans doute un autre élément ayant favorisé l'obtention de ces résultats. Les composites de PP contenant les fibres traitées à la solution de NaOH concentrée à 4 % ont affiché les meilleurs résultats. Les composites de PLA et de l'AC ont obtenu des augmentations similaires concernant les valeurs de résistance, respectivement avec une augmentation d'environ 20 % et 40 % de la TS et de la FS, légèrement sous le composite d'ABS qui lui affiche respectivement une hausse de 29 % et 47 %. Finalement, le composite de chanvre PEHD possède des valeurs plus élevées de 42 % et 16 % pour la TS et la FS, contrairement à la tendance des autres polymères.

En revanche, le module d'élasticité affiche également des valeurs plus élevées chez les composites en chanvre, ce qui démontre que ces derniers possèdent une élasticité, dans certains cas, beaucoup plus faible que le polymère. Les composites en polymère pétrosourcé sont ceux ayant subi la plus forte augmentation de la rigidité, soit de 150 % pour le PEHD, de 22 % pour l'ABS et de 320 % pour le PP. Les composites de chanvre avec les bioplastiques ont tout de même un TM plus élevé que le polymère, mais de façon moins importante, de 20 % pour l'AC et 47 % pour le PLA. Les fibres de renfort, même synthétiques, augmentent la rigidité d'un matériau, ce qui le rend beaucoup plus résistant à la déformation (Shahzad, 2012).

La plus forte résistance et la plus faible élasticité des composites de chanvre semblent être appuyées par les tests de résistance Charpy et d'allongement à la rupture qui ont été effectués sur deux composites dans chaque cas. En effet, le PLA et le PP ont obtenu des valeurs moins élevées que leurs composites de chanvre au niveau du test de résistance Charpy. Également, le PLA et l'AC ont démontré une valeur d'allongement à la rupture supérieure à leur composite de chanvre respectif, comme affiché dans le tableau A.1.

En ce qui concerne les paramètres, le chanvre ne semble pas affecter la dureté dans le cas du composite avec le PLA, mais a légèrement diminué sa densité et sa TTV de $0,03 \text{ g/cm}^3$ et 3°C . Cependant, dans le cas du PEHD, la densité du composite était supérieure du côté du composite de chanvre de $0,13 \text{ g/cm}^3$. Finalement, l'absorption maximale d'humidité se trouve être la dernière propriété examinée ; ce test a été tenté uniquement sur le composite de PP et chanvre, affichant un taux maximal de 6 % après 22 jours d'immersion dans l'eau, contre 0,05 % pour le polymère de PP.

8.2 Environnement

Les données sur les émissions de GES et du besoin énergétique des composites ont été calculées à partir des informations du tableau 2.2 de la section 2.3 (p. 27). Les émissions et le besoin énergétique des polymères et composites sont calculés à partir du transport de la matière première jusqu'à la vente du produit au client. Ces calculs ont été faits à l'aide des formules ci-dessous, pour estimer respectivement les émissions et le besoin énergétique. Pour obtenir des résultats complémentaires aux autres analyses, la proportion de chanvre calculée était de 30 % du poids total, d'où le 0,3 correspondant à la proportion de chanvre et le 0,7 à la proportion du

polymère. Il a été discuté, à la section 2.3, que l’empreinte carbone d’un kilogramme de fibres de chanvre, de la culture à la transformation, est de 0,64 t éq. CO₂/t de fibres, mais la fixe également à 0,45 t éq. CO₂/t durant son cycle de vie, ces données étant représentées par les variables *a* et *b*.

<p>Équation 1 : Formule d'estimation des émissions de GES $[(a - b) * 0,3] + (c * 0,7)$</p> <p>Équation 2 : Formule d'estimation de la demande énergétique $(d * 0,3) + (e * 0,7)$</p>	<p><i>a</i>: 0,64 <i>b</i>: 0,45 <i>c</i>: GES du polymère <i>d</i>: 3,4 <i>e</i>: MJ du polymère</p>
--	---

Figure 8.1 Formules d’estimation des émissions de GES et de la demande énergétique d’un kilo de fibres de chanvre

La variable *d* fait référence au besoin énergétique de la production d’un kilogramme de fibre de chanvre dans l’ensemble de son cycle de vie (voir Tableau 2.2). Les variables *c* et *e* représentent simplement les émissions des polymères vierges en t éq. CO₂/t et la demande énergétique MJ/kg respectivement des différents polymères.

Tableau 8.2 Synthèse des données environnementales étudiées

Polymère	Émissions éq. CO ₂ /t (vierge)	Émissions éq. CO ₂ /t (composite)	Besoin énergétique MJ/kg (vierge)	Besoin énergétique MJ/kg (composite)
ABS	3,46	2,48	95	67,52
AC	0,45	0,37	104	73,92
PEHD	1,5	1,11	76	54,22
PLA	0,5	0,36	57	40,92
PP	1,95	1,42	73	52,12

Les émissions de GES d’un composite de chanvre sont entre 25 % et 30 % plus faibles que les émissions du même volume de polymère vierge. L’AC et le PLA ne profitent pas autant que les thermoplastiques pétrosourcés de cette réduction, avec une empreinte carbone déjà faible. Le composite d’ABS est celui bénéficiant de la plus grande réduction de son volume d’émissions avec une réduction 0,98 t éq. CO₂/t par rapport au polymère d’ABS seulement. Les composites

PP et de PEHD profitent également d'une diminution considérable des émissions de 0,4 et 0,5 t éq. CO₂/t respectivement.

Le besoin énergétique est généralement 30 % moins élevé chez les composites de chanvre que les polymères seuls. Cependant, certains polymères comme l'ABS et l'AC nécessitent une grande quantité d'énergie, donc profitent davantage de cette économie énergétique. En effet, les composites d'ABS et d'AC exigent environ 30 MJ/kg de moins que leur matrice sans renfort, ainsi que de 20 MJ/kg pour le PP et le PEHD. Bien que le PLA requière une quantité d'énergie plus modeste que les autres polymères, son composite de chanvre permet de réduire de 16 MJ/kg supplémentaires.

Il est important de rappeler que l'ensemble des composites présentés associés à chacun des polymères peuvent être traités de la même façon en fin de vie que les polymères vierges.

8.3 Analyse économique

Pour calculer l'estimation du prix des pastilles de plastiques composites, la formule ci-dessous a été appliquée à chaque polymère, où a représente le prix du polymère et b celui de la fibre de chanvre.

$$(a * 0,7) + (b * 0,3)$$

Pour obtenir des résultats complémentaires aux analyses précédentes, la proportion de chanvre calculée était de 30 % du poids total. Puisqu'il n'y a pas de frais associés au changement d'équipements ou d'infrastructure nécessaire, le calcul ne prend pas de facteurs externes en considération.

Tableau 8.3 Prix des polymères et estimation des prix des composites en \$ US/kg

Polymère	Prix 100 % polymère vierge	Prix composite	Différence
ABS	2,87	2,43	- 0,44
AC	3,50	2,87	- 0,73
PEHD	1,50	1,04*	- 0,46
PLA	1,98	1,80	- 0,18
PP	1,10	1,19	+ 0,09

Le tableau 8.3 affiche les prix des polymères, des composites et la différence en \$ US par kilogramme de matériau. À noter que le prix du composite PEHD à 1,04 \$ US/kg est légèrement inférieur à ce qu'il devrait être, grâce à l'utilisation à 50 % de PEHD recyclé, comme discuté à la section 5.5 (p. 55). Au contraire, le PP est le seul polymère dont le prix semble augmenter avec l'ajout de fibres de chanvre, dû au fait que le polymère possède le prix le plus faible des thermoplastiques étudiés. Les composites d'ABS et de PEHD affichent une réduction de près de 0,50 \$ US/kg par rapport au prix du polymère, pour une réduction de 0,18 \$ US/kg seulement pour le PLA. Le composite en AC profite de la plus importante diminution de prix selon l'estimation, justifiée par le prix du polymère qui est le plus élevé des thermoplastiques présentés, avec une réduction de 0,73 \$ US/kg. Comme illustré au tableau A.1 (p. 94), la croissance dans la production de tous les polymères est positive, entre 3 % et 5 % pour les thermoplastiques pétrosourcés et entre 6 % et 16 % pour les bioplastiques.

8.4 Facteurs contraignants

L'adhésion des fibres avec la matrice est l'un des principaux facteurs contraignants, particulièrement en ce qui concerne les thermoplastiques pétrosourcés. Le manque d'adhésion entre les fibres de renfort et la matrice affecte négativement les propriétés mécaniques et chimiques du composite. Bien qu'un traitement mécanique ou chimique soit possible, les résultats peuvent varier en fonction de la matrice, du type de traitement, de la température et du type de mise en forme (Suardana et al., 2011).

Certains paramètres chimiques de la fibre de chanvre apparaissent également comme un facteur contraignant à son utilisation en composite thermoplastique. En effet, les composites de fibres de chanvre affichent une plus grande absorption maximale d'humidité par rapport aux polymères testés en composite, comprenant les biopolymères qui affichaient déjà une valeur plus élevée pour ce paramètre (Chandrasekar et al., 2017). La limite de température dans les opérations de transformation et de mise en forme restreint également l'utilisation de fibres de chanvre et de cellulose en général dans l'utilisation en composite plastique. Certains composites de matrice pétrosourcés, tels le PEHD et l'ABS, ont dû modifier à la baisse leur température de mise en forme afin d'éviter la dégradation des fibres de renfort. Cette diminution peut affecter les propriétés du composite, car ces polymères n'atteignent pas un niveau de viscosité nécessaire favorisant l'adhésion des molécules de cellulose à celles de la matrice (Shahzad, 2012).

L'influence des fibres de cellulose sur l'élasticité des thermoplastiques peut aussi constituer un facteur contraignant en limitant l'utilisation du chanvre en composite pour certains types de produits uniquement. En effet, les fibres de chanvre, tout comme les fibres synthétiques, augmentent de façon importante les propriétés de résistance des polymères, mais également de rigidité. Cet aspect peut être favorable pour l'utilisation du chanvre en composite avec des polymères illustrant déjà ces caractéristiques dans le but de les accentuer, mais peut limiter l'utilisation avec des produits thermoplastiques qui nécessitent un minimum d'élasticité.

8.5 Facteurs favorables

L'utilisation de fibres de chanvre en renfort semble offrir des qualités similaires aux fibres de renfort synthétique en améliorant considérablement les propriétés de résistance des matériaux, dans des proportions variables. En effet, l'ensemble des polymères évalués ont exposé des paramètres plus élevés pour le composite de chanvre. Bien que la rigidité du thermoplastique s'accroisse de façon importante avec l'ajout de chanvre, cette propriété est avantageuse pour certaines utilisations, entre autres, dans les domaines de l'automobile, de l'aéronautique, de l'ingénierie et industriels (Shahzad, 2012).

La réduction des émissions de GES représente un autre facteur favorable à l'utilisation du chanvre en composite thermoplastique. Il a été établi au point 8.2 que l'intégration de

seulement 30 % du poids total du thermoplastique permet de réduire considérablement l'empreinte carbone reliée à la production des matières plastiques identifiées de 25 % à 30 %, s'élevant à près d'une tonne éq. CO₂/t pour le composite d'ABS et de chanvre. La demande énergétique reliée à la production des thermoplastiques diminue également, passant de 35 % à 30 % chez les composites à 30 % de chanvre. Ces deux aspects favorisent ce type d'utilisation du chanvre.

L'ajout de fibres de chanvre contribue non seulement à la réduction des impacts environnementaux impliqués dans la production de produits thermoplastiques, mais permet aussi de réduire le prix entre 0,18 et 0,73 \$ US/kg, à l'exception du PP. De plus, la fibre de chanvre est moins dispendieuse que les fibres synthétiques conventionnelles telles les fibres de carbone, de verre ou d'aramide (Kirilovs et al., 2015). L'aspect économique est une des principales difficultés à surmonter lors de l'implantation d'innovations technologiques, mais le chanvre offre au contraire une opportunité de réduire les coûts de fabrication et de réduire les impacts sur l'environnement. Finalement, l'intégration d'un minimum de 40 % de fibres de chanvre permet au matériau d'être considéré comme un bioplastique, tel que défini à la section 1.6 (p. 14) du présent document, et ainsi de devenir éligible à certaines subventions aux entreprises.

8.6 Recommandations

Les recommandations suivantes sont basées sur les éléments pertinents analysés aux sections précédentes. Ces recommandations se résument à tester davantage le chanvre avec des plastiques recyclés, d'établir un système d'information d'utilisation du chanvre dans les composites thermoplastiques, d'établir le marché spécifique des composites en chanvre, ainsi que de favoriser son utilisation avec des biopolymères et des polymères pétrosourcés plus polluants.

8.6.1 Tester davantage le chanvre avec des plastiques recyclés

Le chanvre en composite avec une portion de PEHD recyclé a été évalué et a affiché une amélioration de certaines propriétés, entre autres de résistance à la traction, à la flexion et aux impacts. Le chanvre pourrait être testé davantage en composite avec des polymères issus du système de récupération. Les composites pourraient être évalués avec d'autres types de

polymère recyclés, ainsi qu'avec plusieurs types de plastiques avec les fibres de chanvre en renfort, qui prodigueraient une constante dans l'expression des propriétés du composite malgré la variation des proportions de polymères. Par ailleurs, l'utilisation de chanvre en plus de plastiques issus du système de récupération ajouterait aux bénéfices de réduction des émissions de GES et de l'énergie nécessaire reliées à la production de ces thermoplastiques.

8.6.2 Établir un système d'information ou une banque de données sur l'utilisation du chanvre en composite thermoplastique

De nombreux éléments entourent cette utilisation relativement nouvelle du chanvre, notamment le type de traitement de la fibre, la température de mise en forme, les additifs compatibles, la disposition des fibres dans la matrice, etc. Il serait intéressant de compiler ces études dans une banque de données scientifiques, afin de pouvoir reproduire l'expérience et comparer les résultats. Il serait nécessaire d'établir un système d'information pour simplement réunir les différents essais qui sont effectués afin de pouvoir comparer les éléments et ainsi distinguer les tendances des résultats globaux. Les études scientifiques sur les composites de chanvre effectuent des essais sur peu de paramètres et sont parfois difficilement accessibles. Cela limite la rapidité du développement de la technologie autour de ce type d'utilisation du chanvre, malgré un intérêt grandissant des scientifiques et fabricants de thermoplastiques (Cherney et Small, 2016).

8.6.3 Viser l'utilisation dans les domaines correspondants aux caractéristiques des composites/marché spécifiques

Au même titre que les composites en fibre de verre, ceux de chanvre possèdent un potentiel commercial important pour certaines utilisations ou industries. Toutefois, ces domaines d'application doivent être explorés davantage afin de déterminer quel est le marché spécifique à ce matériau. Il est également ciblé de consolider et de croître dans les domaines d'application qui utilisent déjà des matériaux composites en chanvre, telle l'industrie automobile (Cherney et Small, 2016).

8.6.4 Favoriser l'utilisation du chanvre avec des bioplastiques pour la polarité des molécules

Le marché des biopolymères est en pleine croissance, et ce, dans de nombreux domaines d'application. Les bioplastiques étudiés dans cet essai ont cependant démontré des propriétés mécaniques légèrement inférieures à celles des thermoplastiques pétrosourcés, ils seraient ainsi avantagés par une charge de renfort comme la fibre de chanvre. Les biopolymères possèdent surtout une prédominance à former des liaisons covalentes entre la matrice et les fibres de cellulose du chanvre, puisqu'ils utilisent des molécules similaires pour produire la matrice. Promouvoir l'utilisation de chanvre en composite avec des biopolymères présente également l'avantage de réduire le prix du produit final, qui est plus élevé chez les bioplastiques de façon générale, ce qui limite leur croissance.

8.6.5 Favoriser l'utilisation du chanvre avec des polymères à forts impacts sur l'environnement

Cette recommandation concerne certains thermoplastiques pétrosourcés, présents ou exclus de cette étude, qui entraînent un haut niveau d'émissions de GES ou de dépense énergétique par leur production. Néanmoins, certains polymères possèdent des caractéristiques uniques ou largement supérieures aux polymères de substitution, signifiant qu'ils sont pour le moment irremplaçables. L'intégration de fibres de chanvre avec des polymères thermoplastiques plus polluants devrait être soutenue dans l'objectif de diminuer l'empreinte carbone du matériau. Il a été démontré que la présence de 30 % de chanvre en poids total d'un composite diminue de 25 % à 30 % l'empreinte carbone du polymère en question. L'utilisation de chanvre à cette fin, lorsque pertinente aux propriétés du polymère, devrait donc être supportée.

CONCLUSION

La solution à la problématique actuelle de pollution par la surconsommation de plastique passe en partie par la substitution de certains polymères pétrosourcés par des bioplastiques. De ces bioplastiques, les composites en fibres de chanvre suscitent l'attention de chercheurs et d'entreprises pour leurs qualités mécaniques élevées par rapport aux autres fibres organiques.

L'objectif principal consistait à analyser les composites de chanvre mis en forme avec différentes matrices et à en effectuer la comparaison avec le polymère sans charges. Cet objectif incluait la comparaison des propriétés physicochimiques principales des polymères et des composites de chanvre avec l'ABS, l'AC, le PEHD, le PLA et le PP et ainsi observer les tendances de l'effet du chanvre dans un composite thermoplastique. La fastidieuse compilation des données scientifiques disponibles sur différents composites de chanvre a permis d'obtenir des résultats par lesquels des tendances claires dans la variation systématique de certaines propriétés sont observables. En effet, les résistances mécaniques des composites de chanvre sont invariablement plus élevées que celles du polymère vierge respectif. En contrepartie, l'élasticité des composites de chanvre est plus faible dans l'entièreté des formulations, en plus d'avoir une plus grande absorption d'humidité.

Les objectifs secondaires consistaient à évaluer l'aspect environnemental et l'aspect économique des différents matériaux comparés. Les impacts principaux reliés à la production de ces plastiques sur l'environnement étaient comparés entre les polymères vierges et les composites de chanvre à 30 % du poids total, il a été établi que les impacts les plus importants sont l'empreinte carbone et la demande énergétique reliées à la production. L'aspect économique a traité principalement du prix, mais a également défini certains éléments avantageux ou contraignants des polymères présentés. Dans la plupart des cas, le prix du composite à 30 % de chanvre est en deçà du prix du polymère vierge, à l'exception du PP qui affiche un prix faible par rapport aux autres thermoplastiques.

Les résultats tirés de l'analyse de ces trois aspects et certains facteurs significatifs ont servi à formuler des recommandations. L'utilisation du chanvre en composite avec des plastiques issus du système de récupération, des bioplastiques ou des plastiques avec une forte empreinte

carbone est proposée. Face à la difficulté d'obtenir des informations concernant les composites de chanvre, il est suggéré de recueillir la documentation dans une banque de données informatisée ou autre. Également, il est primordial d'identifier le marché spécifique des biocomposites thermoplastiques de chanvre afin d'optimiser le potentiel de croissance et de contribuer à la transition vers les produits durables.

Finalement, la question menant à cet essai visait à déterminer si les thermoplastiques en composites de chanvre sont comparables aux plastiques traditionnels pétrochimiques. Or, à la lumière des résultats obtenus, ils sont comparables à certains niveaux, étant supérieurs ou inférieurs à d'autres. Le type d'utilisation du matériau détermine quelles sont les caractéristiques favorables à un matériau afin qu'il soit performant. Néanmoins, les composites de chanvre sont plus performants au niveau environnemental et économique que les polymères pétrosourcés en général.

RÉFÉRENCES

- Accuray Research LLP. (2017). *Global cellulose acetate market analysis & trends - Industry forecast to 2025*. Repéré à <https://www.researchandmarkets.com/reports/4399993/global-cellulose-acetate-market-analysis-and>
- Adamcová, D., Elbl, J., Zloch, J., Vaverková, M. D., Kintl, A., Juříčka, D., ... Brtnický, M. (2017). Study on the (bio)degradation process of bioplastic materials under industrial composting conditions. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(3). Repéré à <https://acta.mendelu.cz/65/3/0791/>
- Anum Laate, E. (2016). *Industrial hemp seed production costs and returns in Alberta, 2015*. Alberta Agriculture and Forestry. Repéré à [https://www1.agric.gov.ab.ca/\\$Department/deptdocs.nsf/all/econ16267/\\$FILE/2015IndustrialHempCOP.pdf](https://www1.agric.gov.ab.ca/$Department/deptdocs.nsf/all/econ16267/$FILE/2015IndustrialHempCOP.pdf)
- Bailly, G., Bordi, C., Broussaud, M.-J., Burgio, M., Courbet, S., Dupin, J.-M., ... Vallée, J.-M. (2011). *Sciences physiques et chimiques*. Paris, France : Nathan.
- Belliveau, M. (2010). *The business case for commercial production of bioplastics in Maine*. Maine Technology Institute. Repéré à https://www.ourhealthyfuture.org/sites/default/files/pdfs/the_business_case_for_commercial_production_of_bioplastics_in_maine_final.pdf
- Boustead, I. (2005a). *Eco-profiles of the European plastics industry - ABS*. PlasticsEurope. Repéré à http://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/abs_311147f0-fabd-11da-974d-0800200c9a66.pdf
- Boustead, I. (2005b). *Eco-profiles of the European plastics industry - High density polyethylene (HDPE)*. PlasticsEurope. Repéré à http://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/hdpe_311147f2-fabd-11da-974d-0800200c9a66.pdf
- Boustead, I. (2005c). *Eco-profiles of the European plastics industry - Polypropylene (PP)*. PlasticsEurope. Repéré à http://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/pp_31116f04-fabd-11da-974d-0800200c9a66.pdf
- Castro-Aguirre, E., Iñiguez-Franco, F., Samsudin, H., Fang, X. et Auras, R. (2016). Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 333-366. Repéré à <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169409X16300965>

- Chandrasekar, M., Ishak, M. R., Sapuan, S. M., Leman, Z. et Jawaid, M. (2017). A review on the characterisation of natural fibres and their composites after alkali treatment and water absorption. *Plastics, Rubber and Composites*, 46(3), 119-136. Repéré à <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14658011.2017.1298550>
- Cherney, J. et Small, E. (2016). Industrial hemp in North America: Production, politics and potential. *Agronomy*, 6(4), 58. Repéré à <http://www.mdpi.com/2073-4395/6/4/58>
- Choi, J. S., Lim, S. T., Choi, H. J., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Misra, M. et Wibowo, A. (2004). Preparation and characterization of plasticized cellulose acetate biocomposite with natural fiber. *Journal of Materials Science*, 39(21), 6631-6633. Repéré à <http://link.springer.com/10.1023/B:JMSC.0000044909.60878.97>
- Crompton, T. R. (2012). *Physical testing of plastics*. Smithers Rapra Technology. Repéré à https://books.google.ca/books/about/Physical_Testing_of_Plastics.html?id=qM62YgEACAAJ&redir_esc=y
- Davoudi, K. (2013). *Mechanical properties of polymers*. Repéré à https://scholar.harvard.edu/files/kamyar/files/2013-10-17_deformation_of_polymers.pdf
- Durante, M., Leone, C., Ussorio, M. et Visconti, I. C. (2004). Solution impregnation of natural fibres/ABS matrix composite. Repéré à <http://www.escm.eu.org/docs/eccm/B029.pdf>
- École nationale supérieure des mines de Saint-Étienne (EMSE). (2012). *Traction et compression*. Repéré à <https://www.technologuepro.com/resistance-des-materiaux-2/chapitre-3-traction-et-compression.pdf>
- Ellen MacArthur Foundation. (2016). The new plastics economy: Rethinking the future of plastics. World Economic Forum. Repéré à http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf
- Fan, M. (2010). Characterization and performance of elementary hemp fibres: Factors influencing tensile strength. *BioResources*, 5(4). Repéré à http://stargate.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_05_4_2307_Fan_Elementary_Hemp_Fibers/738
- Farah, S., Anderson, D. G. et Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA and their functions in widespread applications: A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392. Repéré à <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169409X16302058>

- Festucci-Buselli, R. A., Otoni, W. C. et Joshi, C. P. (2007). Structure, organization, and functions of cellulose synthase complexes in higher plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 19(1), 1-13. Repéré à http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-04202007000100001&lng=en&tlng=en
- Gironi, F. et Piemonte, V. (2011). Bioplastics and petroleum-based plastics: Strengths and weaknesses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33(21), 1949-1959. Repéré à <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567030903436830>
- Glynwed. (2008). *Le polyéthylène*. Repéré à http://www.aliaxis-ui.fr/Docs/Documents/PUSH-FAST_dossier.pdf
- Goossens, J. (2012). *Biopackaging*. Repéré à <http://www.preventpack.be/sites/default/files/publications/201206-14-dossier.pdf>
- Guo, Q. et Crittenden, J. C. (2011). An energy analysis of polylactic acid (PLA) produced from corn grain and corn stover integrated system. Dans *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology* (p. 1-5). Repéré à <https://ieeexplore.ieee.org/document/5936897>
- Hammami, T. et Louati, H. (2016). *Introduction et généralités sur les matières plastiques*. Repéré à <https://www.technologuepro.com/cours-procedes-mise-en-forme-matieres-plastiques/chapitre-1-introduction-generalites-sur-matieres-plastiques.pdf>
- Hargitai, H., Rácz, I. et Anandjiwala, R. D. (2008). Development of hemp fiber reinforced polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 21(2), 165-174. Repéré à <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0892705707083949>
- Heinze, T. et Petzold, K. (2008). Cellulose chemistry: Novel products and synthesis paths. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/285330392_Cellulose_chemistry_Novel_products_and_synthetic_paths
- Hu, R. et Lim, J.-K. (2007). Fabrication and mechanical properties of completely biodegradable hemp fiber reinforced polylactic acid composites. *Journal of Composite Materials*, 41(13), 1655-1669. Repéré à <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998306069878>
- Jamshidian, M., Tehrany, E. A., Imran, M., Jacquot, M. et Desobry, S. (2010). Poly-Lactic acid: production, applications, nanocomposites, and release studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(5), 552-571. Repéré à <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x>

- Kershaw, P. J. (2015). *Biodegradable plastics & marine litter: misconceptions, concerns and impacts on marine environments*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. Repéré à https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7468/-Biodegradable_Plastics_and_Marine_Litter_Misconceptions,_concerns_and_impacts_on_marine_environments-2015BiodegradablePlasticsAndMarineLitter.pdf.pdf?sequence=3
- Kirilovs, E., Soliženko, R. et Kukle, S. (2015). Specific of hemp fiber's plastic composite Projection. *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, volume 1*. Repéré à <http://journals.ru.lv/index.php/ETR/article/view/900>
- Larcher, B. (2012). *Les plastiques*. Repéré à <https://www.naga44.org/IMG/pdf/plastiques.pdf>
- Lauters, G. (2016). Les bioplastiques sont-ils vraiment écologiques ? Écoconso. Repéré à <http://www.ecoconso.be/fr/content/les-bioplastiques-sont-ils-vraiment-ecologiques>
- Lecomte-Beckers, J. (2009). *Physique des matériaux : Partie Polymères* [Cours universitaire]. Liège, Belgique. Repéré à <http://dhaouadiramzi.e-monsite.com/medias/files/ch-1-2.pdf>
- Lu, N., Swan, R. H. et Ferguson, I. (2012). Composition, structure, and mechanical properties of hemp fiber reinforced composite with recycled high-density polyethylene matrix. *Journal of Composite Materials*, 46(16), 1915-1924. Repéré à <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998311427778>
- Maddah, A. H. (2016). Polypropylene as a promising plastic: A review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1-11. Repéré à <http://article.sapub.org/10.5923.j.ajps.20160601.01.html>
- Mark, J. E. (2009). *Polymer data handbook* (2^e éd.). Oxford, England: Oxford University Press.
- Material Properties Database (2009a). Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) properties. Repéré à <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene-ABS>
- Material Properties Database (2009b). Cellulose Acetate Butyrate (CAB) properties. Repéré à <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Cellulose-Acetate-Butyrate-CAB>
- Material Properties Database (2009c). Cellulose Acetate Propionate (CAP) properties. Repéré à <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Cellulose-Acetate-Propionate-CAP>
- Material Properties Database (2009d). Cellulosic Plastic (CA) properties. Repéré à <https://www.makeitfrom.com/material-group/Cellulosic-Plastic>

- Material Properties Database (2009e). Polylactic Acid (PLA) properties. Repéré à <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polylactic-Acid-PLA-Polylactide>
- Material Properties Database (2009f). Polypropylene (PP) properties. Repéré à <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Polypropylene-PP-Homopolymer>
- Material Properties Database (2009g). Unfilled HDPE properties. Repéré à <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Unfilled-HDPE>
- Mohanty, A., Wibowo, A., Misra, M. et Drzal, L. (2004). Effect of process engineering on the performance of natural fiber reinforced cellulose acetate biocomposites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 35(3), 363-370. Repéré à <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X0300294X>
- Mohsenzadeh, A., Zamani, A. et Taherzadeh, M. J. (2017). Bioethylene production from ethanol: A review and techno-economical evaluation. *ChemBioEng Reviews*, 4(2), 75-91. Repéré à <http://doi.wiley.com/10.1002/cben.201600025>
- National Academy of Sciences. (1994). *Polymer science and engineering: The shifting research frontiers*. Washington, DC: National Academies Press. Repéré à <http://www.nap.edu/catalog/2307>
- Ouajai, S. et Shanks, R. A. (2009). Biocomposites of cellulose acetate butyrate with modified hemp cellulose fibres. *Macromolecular Materials and Engineering*, 294(3), 213-221. Repéré à <http://doi.wiley.com/10.1002/mame.200800266>
- Palmer, K. M. (2015, 7 juillet). Sorry, but the perfect Lego brick may never be eco-friendly. *Wired*. Repéré à <https://www.wired.com/2015/07/sorry-perfect-lego-brick-may-never-eco-friendly/>
- Parker, L. (2017, 19 juillet). A whopping 91% of plastic isn't recycled. *National Geographic News*. Repéré à <https://news.nationalgeographic.com/2017/07/plastic-produced-recycling-waste-ocean-trash-debris-environment/>
- Plastics Insight. (2018a). ABS plastic production, price and market demand. *Plastics Insight*. Repéré à <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/abs-plastic/>
- Plastics Insight. (2018b). HDPE Production Capacity, Price and Market. *Plastics Insight*. Repéré à <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/hdpe/>
- Plastics Insight. (2018c). Polylactic Acid Production, Price and Market. *Plastics Insight*. Repéré à <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polylactic-acid/>

- Plastics Insight. (2018d). Polypropylene Production Capacity, Market and Price. *Plastics Insight*. Repéré à <https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polypropylene/>
- Plastics International. (2018). Hardness scale: Durometer comparisons of materials. Repéré à <http://www.plasticsintl.com/polyhardness.htm>
- PolyCraft World. (2015). Acrylonitrile-butadiene-styrene pellets. Repéré à [https://polycraft.utdallas.edu/index.php?title=Sack_\(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene_Pellets\)](https://polycraft.utdallas.edu/index.php?title=Sack_(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene_Pellets))
- Puls, J., Wilson, S. A. et Höltter, D. (2011). Degradation of cellulose acetate-based materials: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(1), 152-165. Repéré à <http://link.springer.com/10.1007/s10924-010-0258-0>
- Recycled Plastics. (2014). Thermoplastics vs Thermosetting plastics. Repéré à <http://www.recycledplastic.com/index.html%3Fp=10288.html>
- Recyc-Québec. (2015). *Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Québec. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2015.pdf>
- Recyc-Québec. (2017). *Prix de la matière payée aux récupérateurs et livrée chez les recycleurs - Janvier 2017*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/indice-prix-matieres-janvier2017.pdf>
- Reddy, R. L., Reddy, V. S. et Gupta, G. A. (2013). Study of bio-plastics as green & sustainable alternative to plastics. *ISO 9001:2008 Certified Journal*, 3(5). Repéré à <https://pdfs.semanticscholar.org/9e8c/b3ddb5499e2f7226926feed35f87addbaad1.pdf>
- Reis, R. A., Vladimir Oliveira, J. et Nobrega, R. (2001). Diffusion coefficients in polymer-solvent systems for highly concentrated polymer solutions. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 18(4), 367-384. Repéré à http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0104-66322001000400003&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- Rudeekit, Y., Numnoi, J., Tajan, M., Chaiwutthinan, P. et Leejarkpai, T. (2008). Determining biodegradability of polylactic acid under different environments. *Journal of Metals, Materials and Minerals*. Vol.18 No.2 Pp.83-87, 2008, 18(2). Repéré à <http://www.material.chula.ac.th/Journal/v18-2-2/83-87%20RUDEEKIT.pdf>
- Schimanski, T. (2002). *High-performance polypropylene structures for eco-friendly, fully recyclable composites*. Technische Universiteit Eindhoven. doi:10.6100/ir555619

- Senčič, B., Šolić, S. et Leskovšek, V. (2014). Fracture toughness–Charpy impact test–Rockwell hardness regression-based model for 51CrV4 spring steel. *Materials Science and Technology*, 30(12), 1500-1505. Repéré à <http://repository.tue.nl/555619>
- Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites: A review. *Journal of Composite Materials*, 46(8), 973-986. Repéré à <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998311413623>
- Shen, L. (2011). *Bio-based and recycled polymers for cleaner production*. Group of Science, Technology and Society, Copernicus Institute, Faculty of Science, Utrecht University. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/50296475_Bio-based_and_recycled_polymers_for_cleaner_production_an_assessment_of_plastics_and_fibres
- Singh, S., Deepak, D., Aggarwal, L. et Gupta, V. K. (2014). Tensile and flexural behavior of hemp fiber reinforced virgin-recycled HDPE matrix composites. *Procedia Materials Science*, 6, 1696-1702. Repéré à <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211812814005203>
- Suardana, N. P. G., Piao, Y. et Lim, J. K. (2011). Mechanical properties of hemp fibers and PP composites: Effects of chemical surface treatment. *Materials Physics and Mechanics*, (11), 1-8. Repéré à http://www.ipme.ru/e-journals/MPM/no_11111/suardana.pdf
- Taillefer, S. (2010). *Les matières organiques : Fiche informative*. Recyc-Québec. Repéré à <http://www.recycquebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Fiche-compost.pdf>
- Tayeb, H. (2013). *Acetate de cellulose, synthèse, propriétés et applications* (Mémoire de Master). Université d'Abou Bakr Belkaid, Algérie. Repéré à <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6294/1/acetate-de-cellulose-version-finale.pdf>
- ter Halle, A., Ladirat, L., Gendre, X., Goudouneche, D., Pusineri, C., Routaboul, C., ... Perez, E. (2016). Understanding the fragmentation pattern of marine plastic debris. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5668-5675. Repéré à <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.6b00594>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (1995). *Emissions factors and AP-42*. US EPA. Repéré à <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch06/final/c06s09.pdf>
- University of Cambridge. (2006). *Recycling of plastics*. Cambridge, England. Repéré à <http://www-eng.cam.ac.uk/impee/topics/RecyclePlastics/files/Recycling%20Plastic%20v3%20PDF.pdf>
- University of Southern Mississippi. (2005). Tacticity. Repéré à <https://www.pslc.ws/macrog/tact.htm>

- Wibowo, A. C., Desai, S. M., Mohanty, A. K., Drzal, L. T. et Misra, M. (2006). A solvent free graft copolymerization of maleic anhydride onto cellulose acetate butyrate bioplastic by reactive extrusion. *Macromolecular Materials and Engineering*, 291(1), 90-95. Repéré à <http://doi.wiley.com/10.1002/mame.200500171>
- Wibowo, A. C., Mohanty, A. K., Misra, M. et Drzal, L. T. (2004). Chopped industrial hemp fiber reinforced cellulosic plastic biocomposites: Thermomechanical and morphological properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(16), 4883-4888. Repéré à <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie030873c>
- Yu, Z., Li, Y., Zhao, Z., Wang, C., Yang, J., Zhang, C., ... Wang, Y. (2009). Effect of rubber types on synthesis, morphology, and properties of ABS resins. *Polymer Engineering & Science*, 49(11), 2249-2256. Repéré à <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.21475>
- Zion Market Research. (2018). Cellulose acetate market to record lucrative growth, revenue to surge to US\$7.01 Bn by 2021. Repéré à <https://www.zionmarketresearch.com/news/global-cellulose-acetate-market>

Tableau A.1 Synthèse des éléments analysés

Polymère	Propriétés					Environnement			Économie						
	TS (MPa)	FS (MPa)	TM (GPa)	Charpy (kJ/m²)	Allongement à la rupture (%)	Densité (g/cm³)	TTV (°C)	Dureté	Humidité (%)	Fin de vie	Émissions GES (t éq. CO₂)	Besoin énergétique	Prix	Croissance (%)	Méthodes de mise en forme
ABS	45	75	2,5	20	35	1,05	110	RR102	0,1	Recyclable	3,46 t éq. CO₂/t	95 MJ/kg	2,87 US \$/kg	5	Injection, thermoformage, extrusion
Composite ABS¹	58	110	8	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	Recyclable	2,48 t éq. CO₂/t	67,52 MJ/kg	243 US \$/kg	S.O.	Injection, thermoformage, extrusion
CA	30	55	1,7	20	35	1,28	200	RR71	2,2	Recyclable Biodégradable Compostable	0,45 t éq. CO₂/t	104 MJ/kg	350 US \$/kg	6,8	Injection, thermoformage, extrusion, calandrage
Composite CA et fibres de chanvre²	36	77	2,55	N/D	5%	N/D	127	N/D	N/D	Recyclable Biodégradable Compostable	0,37 t éq. CO₂/t	73,92 MJ/kg	287 US \$/kg	S.O.	Injection, thermoformage, extrusion, calandrage
PEHD	32	32	0,8	16	150	0,96	-110	RR73	0,02	Recyclable	1,5 t éq. CO₂/t	76 MJ/kg	150 US \$/kg	3	Injection, extrusion, thermoformage, rotomoulage
Composite PEHD recyclé et fibres de chanvre³	45,7	37,1	2,02	N/D	N/D	1,09	N/D	N/D	N/D	Recyclable	1,11 t éq. CO₂/t	54,22 MJ/kg	104 US \$/kg	S.O.	Injection, extrusion, thermoformage, rotomoulage
PLA	45	80	4,1	24	6	1,25	60	RR98	3	Recyclable Biodégradable Compostable	0,5 t éq. CO₂/t	57 MJ/kg	138 US \$/kg	16	Injection, thermoformage, extrusion
Composite PLA et fibres de chanvre⁴	54,6	112,7	9,3	24,5	2%	1,22	57	RR98	N/D	Recyclable Biodégradable Compostable	0,36 t éq. CO₂/t	40,92 MJ/kg	180 US \$/kg	S.O.	Injection, thermoformage, extrusion
PP	33	40	1,5	16	150	0,91	-20	RR90	0,05	Recyclable	1,95 t éq. CO₂/t	73 MJ/kg	110 US \$/kg	4,4	Injection, extrusion, thermoformage, rotomoulage, calandrage
Composite PP et fibres de chanvre⁵	60,2	73,3	6,4	29	N/D	N/D	N/D	N/D	6	Recyclable	1,42 t éq. CO₂/t	52,12 MJ/kg	119 US \$/kg	S.O.	Injection, extrusion, thermoformage, rotomoulage, calandrage